DESMANTELAMIENTO DE CENTRALES NUCLEARES

INVESTIGACION y CIENCIA

MAYO 2003
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

PLUMAS DE DINOSAURIO

MATERIA OSCURA

OSTEOPOROSIS

GLOBALIZACION DIGITAL

EL GEN DE LAS ANTENAS

GASTRONOMIA MEDIEVAL





INVESTIGACION y CIENCIA

Mayo de 2003 Número 320

SECCIONES

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

INVESTIGACION y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
REVIEWS EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *La búsqueda de la materia oscura*; Luis Bou: *Globalización de la cultura digital* y *Aventuras problemáticas*; Esteban Santiago: *Regeneración ósea*; Expiración García: *La gastronomía medieval*; José Joaquín Moratalla García: *Origen y evolución de la pluma*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Planetas libres y cúmulos estelares*; J. Vilardell: *Hace...*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*



Portada: Kazuhiko Sano

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

OBJETIVO MARTE. «Durante casi un siglo Marte ha fascinado a los astrónomos, al par que alimentaba la credulidad de las gentes, de lo cual no hace tanto tuvimos un ejemplo con el gran pánico ‘marciano’ desatado por un programa radiofónico. Los hechos, aunque no tan emocionantes como las viejas cábalas, tienen su interés. La característica más importante y notable del planeta son los casquetes blancos que cubren sus regiones polares. Exhiben un curioso ritmo de crecida y reflujo. Al final del verano, el casquete polar cubre en cada hemisferio unos diez millones de kilómetros cuadrados. Pero una pequeña mancha deslumbrante permanece junto al polo, incluso en pleno verano. Respecto a la fina estructura de los ‘canales’, queda mucho por aclarar. —Gérard de Vaucouleurs.»

ELECCIONES EN DIRECTO. «La campaña presidencial de 1952 fue la primera en que la televisión tuvo un papel destacado. Según un estudio de la Universidad de Michigan, el hecho más digno de mención es que la gente se tomó la molestia de seguir la campaña por la televisión. Sólo alrededor de un 40 por ciento de los hogares estadounidenses tiene televisor, pero en torno al 53 por ciento de la población vio programas sobre las elecciones; ahí se ve el efecto de las visitas a los conocidos para ver la televisión. Respecto a cómo ésta afectó al voto en sí, carecemos de pruebas claras. Quienes consideraron la televisión como su fuente informativa más importante votaron por Dwight D. Eisenhower más o menos en la misma proporción que quienes confiaron principalmente en la radio y la prensa. A Adlai Stevenson le fue algo mejor con los devotos de la televisión.»

...cien años

TORMENTA DE POLVO. «Los profesores Hellmann y Meinardus han efectuado detalladas investigaciones relativas a la tormenta de polvo que barrió las costas de Africa del Norte, Sicilia, Italia, Austria-Hungría, Prusia y la Islas Británicas entre el 12 y el 19 de marzo de 1901. El polvo se originó en las tormentas que tuvieron lugar el 8, 9 y 10 de marzo en el desierto de El Erg, situado en la parte meridional de Argelia. Aproximadamente 1.800.000 toneladas de polvo fueron transportadas por una gran masa de aire que se trasladó a gran velocidad desde Africa del Norte hasta el norte de Europa. Todos los análisis microscópicos y químicos indican que ese polvo no es volcánico ni cósmico.»



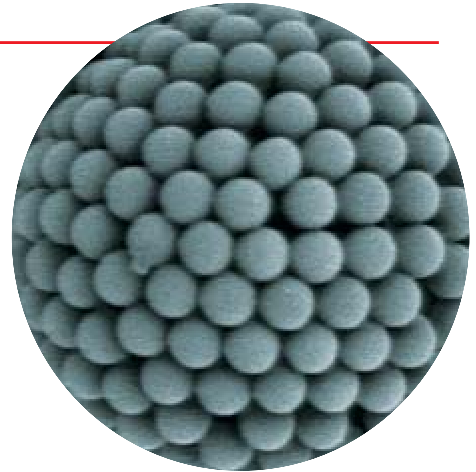
*Belleza Yakuta, **Siberia**, 1903*

EXPEDICIÓN A SIBERIA. «La Expedición Jesup al Pacífico Norte, organizada bajo los auspicios del Museo Americano de Historia Natural, ha terminado su trabajo de campo. Los exploradores y científicos rusos, Waldemar Jochelson y Waldemar Bogoras, consiguieron en Siberia notables especímenes y descubrimientos etnológicos. Nuestra ilustración muestra la indumentaria de una rica belleza yakuta. Los yakutos son la más numerosa y próspera de las razas siberianas. Lo más llamativo del traje, aparte del alarde de pieles, es la generosa exhibición de ornamentos de plata que lo adornan. Las bandas afiligranadas, finamente ejecutadas, de cuello y hombros tienen un ancho de casi ocho centímetros y una longitud de varios metros. El objeto de la expedición, bajo la supervisión del doctor Franz Boas, era investigar las recónditas tribus del noreste asiático y comparar sus costumbres con las de los habitantes del extremo noroeste de América del Norte.»

ZEPPELIN EN NÚMEROS ROJOS. «Se anuncia en Berlín que el hangar de aeronaves del conde Zeppelin, sito en el lago Constanza, será subastado junto con el aparato. El conde está arruinado. En la empresa se le fueron más de un millón de marcos.»

...ciento cincuenta años

POLIGENISMO. «El profesor Louis Agassiz, en el ciclo de conferencias que ha pronunciado recientemente en Charleston (Carolina del Sur), manifestó y proclamó su rechazo de que todos los hombres desciendan por generación ordinaria de Adán, o de una pareja, o de dos o tres parejas. Opina, según nos cuenta el ‘Charleston Mercury’, que los hombres fueron creados por naciones, con un origen separado para cada nacionalidad definida. El profesor Agassiz ha estado retando al león en su guarida; y nos referimos al reverendo doctor Smyth, de Charleston, autor de una obra muy competente acerca de la unidad de la raza humana, la doctrina bíblica de que todos los hombres desciende de una única pareja, Adán y Eva. Es ésta una cuestión científica que, en un plazo de pocos años, ha generado no poca discusión entre los amantes de las ciencias naturales.»



Unas cuentas de poliestireno de sólo unas micras de diámetro recubren una gotita de agua

FISICA MATEMATICA

Cuentas y esferas

¿Qué estructura adoptarían unas bolas que recubriesen una esfera mayor? Leonhard Euler demostró en el siglo XVIII que una red de triángulos adyacentes que cubriese una esfera debería tener doce defectos, o lugares con cinco vecinos en vez de seis (por eso tienen los balones de fútbol 12 pentágonos entre sus hexágonos). Ahora se ha predicho y confirmado que una esfera compuesta por cientos de partículas o más libera tensiones obligando a las partículas que se vayan añadiendo a tener cinco vecinos o siete; crean más defectos que los doce de Euler. Los defectos se disponen en líneas, en "cicatrices", cuyas longitudes son proporcionales al diámetro de la esfera. Con un microscopio se ha seguido la manera en que unas cuentas de poliestireno micrométricas iban recubriendo unas gotas minúsculas de agua. Las longitudes de las cicatrices no dependen en principio del tipo de partícula de que se trate. El resultado debería ser aplicable al diseño de materiales que se autoensamblan, al estudio de las cubiertas proteínicas y al conocimiento de los defectos de las moléculas de fullereno. *—J.R. Minkel*

GENETICA Y MEDICINA

Algún efecto de pequeñas diferencias

Un equipo internacional de biólogos ha estudiado la diversidad genética humana analizando una muestra de 1056 individuos de 52 poblaciones. Las poblaciones se definían por criterios culturales y geográficos (toscanos, palestinos, mayas, han, vascos, melanesios, etc.). Cabía, pues, preguntarse si esta manera de segmentar la humanidad guarda alguna correlación con posibles diferencias genéticas entre los grupos; algunas establecerían quizá propensiones distintas a ciertas enfermedades. Las diferencias individuales dentro de cada población de la muestra abarcaban un 93-95 % de la variedad genética total; las diferencias entre poblaciones sólo aportaban alrededor de un 5 %. La mayoría de los alelos se reparten por la población mundial entera. Nada más que un 7,4 % de los alelos considerados en la muestra eran propios de una sola región, y se trataba de variedades raras, con una frecuencia de un uno por ciento en la región correspondiente. Aun así, una técnica estadística pudo repartir la muestra en subgrupos humanos caracterizados por pequeñas diferencias en las frecuencias de diversos alelos. Existía, aunque con excepciones, una buena correlación entre la división original en poblaciones y esta otra por afinidades genéticas. De ahí que los autores extraigan la conclusión de que el conocimiento de la ascendencia de los individuos facilita en ciertos casos la evaluación de los riesgos epidemiológicos, si bien no permite prescindir en general de la información genética.

GEOFISICA

Figuras en el suelo

En las tierras heladas de las regiones polares y alpinas las piedras dibujan a menudo barras, laberintos o patrones repetitivos de círculos y polígonos. Sólo ahora se ha construido un modelo que reproduce de manera unificada esa fenomenología. Los viejos modelos que intentaron explicar sin éxito las figuras de los suelos polares eran reduccionistas; se basaban en las interacciones locales, en una sola escala de distancias y tiempos, de unos elementos básicos —granos de tierra, guijarros—. El nuevo modelo de Kessler y Werner, en cambio, como explica Daniel Mann en el mismo numero de *Science* que lo ha publicado, se funda en retroalimentaciones entre fenómenos de distintas escalas espaciales y temporales. La congelación y descongelación, en días o meses, de cristales de hielo sobre cada centímetro cuadrado de suelo, con sus efectos de separación de piedras y suelo y de compresión longitudinal de los montones de piedras, mantienen las figuras, pero los contornos de éstas, que se han constituido a lo largo de siglos y miden metros, afectan a su vez a la manera en que actúan la congelación y la descongelación. Se trata de un proceso de "autoorganización". Aunque la ciencia de la autoorganización se haya convertido desde hace tiempo en una disciplina floreciente de la física, sus premisas se internan en terreno escurridizo, donde resuena un problema filosófico fundamental, el de las difíciles relaciones entre estructura y atomismo, tipo e individuo. Ciertos físicos han expresado opiniones fuertes al respecto. Uno de los creadores del modelo estándar de las partículas elementales, Steven Weinberg, defiende que la ciencia no puede ser, en última instancia, sino reduccionista; en cambio, según uno de los más destacados físicos de la materia condensada, Philip K. Anderson, los distintos niveles de la realidad poseen leyes propias independientes de las leyes de las partículas elementales; sin contradecirlas, no dimanan de ellas.

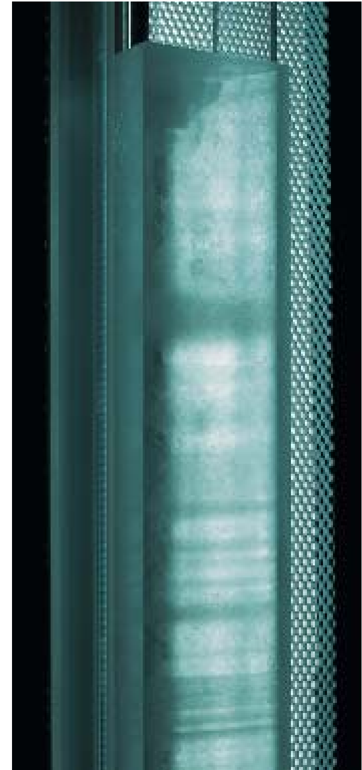


La física de las heladas y deshielos explica estos círculos pedregosos de dos metros de ancho de Spitsbergen (Noruega)

CLIMATOLOGIA

La gallina o el huevo

Las sucesivas glaciaciones y deglaciaciones del Cuaternario se correlacionan con las periodicidades de las alteraciones finas que va sufriendo la órbita terrestre. Los testigos extraídos de las profundidades del hielo antártico correlacionan a su vez el nivel de dióxido de carbono con la temperatura media de cada época. La determinación del nexo causal entre esos factores tropieza con una cierta imprecisión de la datación relativa de los cambios del CO_2 con respecto a las modificaciones de la temperatura. El CO_2 se mide en el aire atrapado en el hielo, pero la difusión vertical del aire dentro de la parte superior de la capa de hielo (el *firn*) lleva a que el aire que va quedando atrapado en su base sea más joven que el hielo que lo rodea. Esa diferencia de edad es la que se conoce con imprecisión (del orden de mil años). Para obviar este problema, un equipo internacional ha utilizado el aire atrapado en el hielo acumulado sobre el lago Vostok, en la Antártida, no sólo para medir el CO_2, sino también los cambios de temperatura, aprovechando que afectan a la composición isotópica del argón del aire (la evolución de la temperatura se ha inferido normalmente de su efecto en el hielo). Han obtenido que, en la Terminación III (una deglaciación de hace 240.000 años), el aumento de CO_2 se retrasó unos 800 años con respecto al calentamiento antártico. El océano debió de ir perdiendo ese gas a medida que el agua se calentaba. No debe deducirse que el nivel crecido de CO_2 fue una mera consecuencia de la deglaciación y no intervino en la subida global de las temperaturas, que continuó durante 5000 años. El aumento de CO_2 precedió a la deglaciación boreal. Amplificó el calentamiento inicial generado por los cambios orbitales; retroalimentaciones atmosféricas que también actúan hoy en día reforzaron, a su vez, esa amplificación.



Los testigos de hielo guardan el secreto de la interacción entre el aumento de la cantidad de CO_2 en la atmósfera y los cambios mundiales de temperatura

FISICA DE SUPERCONDUCTORES

Levita y, además, gira

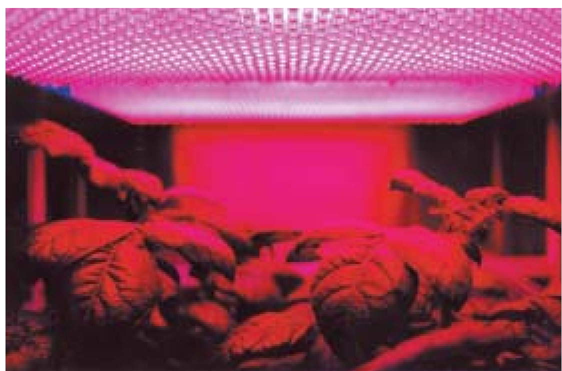
Un imán permanente situado sobre un superconductor levita. Esto era bien sabido. Pero además gira, si está colocado de manera vertical sobre el superconductor, alrededor de un eje horizontal. El fenómeno ya se observó en 1990 y 1991, pero había caído en el olvido. Un físico de la Universidad de California en San Diego, J. E. Hirsch, con D. J. Hirsch, lo ha redescubierto y, además, ha ofrecido una explicación. Un disco de imán de 2,5 mm de radio y 1,2 de grosor se levanta 0,4 milímetros del disco del superconductor, de 22 y 3 mm de diámetro y grosor, que descansa sobre una base metálica en un baño de nitrógeno líquido. La velocidad de rotación llega a un máximo —unas cuatro revoluciones por segundo— y se mantiene así indefinidamente pese a la fricción del aire. El dispositivo, según Hirsch, es una máquina térmica de la máxima simplicidad —sólo tiene una parte móvil, el propio imán—. El calor de la atmósfera lo impulsa: la parte superior, más alejada del superconductor, está en contacto con un entorno más caliente, del que toma calor, que la parte inferior devuelve, en parte, a un entorno más frío. La parte no devuelta se convierte en movimiento de rotación: una mitad del disco del imán desciende mientras la otra asciende; comparando puntos situados a una misma altura con respecto al superconductor, los que bajan están más calientes —porque vienen de un entorno más cálido— que los que suben; como la fuerza de levitación que ejerce el superconductor sobre el imán depende de la magnetización de éste, y la magnetización depende a su vez de la temperatura, se produce un momento de giro.

FOTOTERAPIA

En rojo

Gracias a la luz roja, quizá se detengan, reviertan incluso, lesiones oculares que causan ceguera. La NASA ha diseñado un diodo emisor de luz roja, del tamaño de un mazo de naipes, que decuplica la potencia de la luz solar en esa misma frecuencia. Se concibió para que los cultivos espaciales se desarrollasen más deprisa, pero los astronautas observaron que también curaba antes los cortes. Está claro que esa luz activa las mitocondrias, generadoras celulares de energía. Se desconoce aún el mecanismo. La neurotoxicóloga Janis T. Eells, de la Escuela Médica de Wisconsin, estudió el envenenamiento por metanol, que se cree induce ceguera porque inhibe las mitocondrias, muy productivas en los ojos. Pese a su escepticismo inicial, constató que unas ratas envenenadas con metanol recuperaron entre un 60 % y un 70 % de la función retiniana tras recibir tres disparos de luz del diodo rojo, cada uno de 144 segundos de duración, en un plazo de 50 horas. Tiene pensado investigar la utilidad de esa luz en el tratamiento del glaucoma.

—Charles Choi

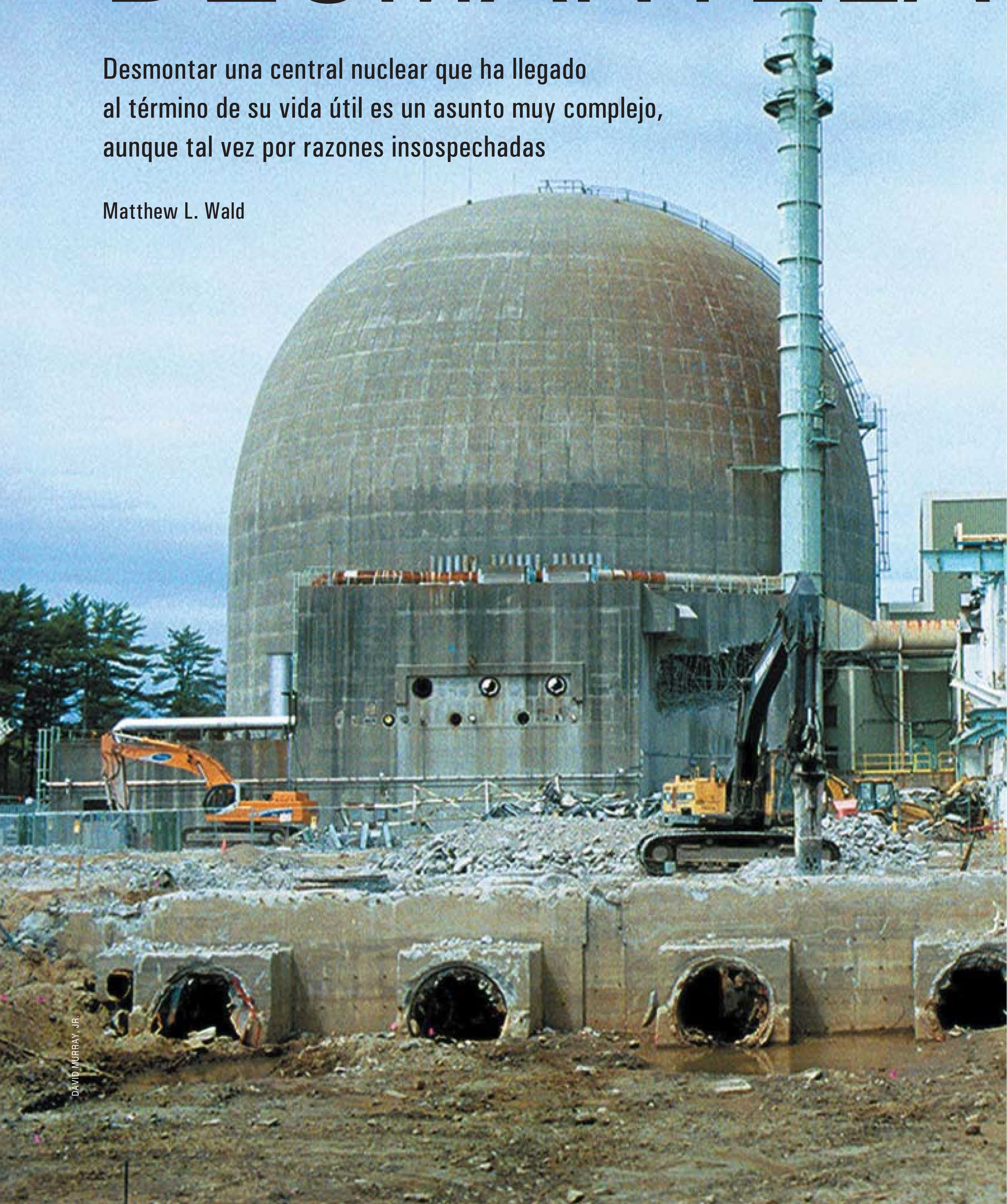


Unos potentes diodos emisores de luz roja estimulan el desarrollo de las plantas y repara tejidos

DESMANTELA

Desmontar una central nuclear que ha llegado al término de su vida útil es un asunto muy complejo, aunque tal vez por razones insospechadas

Matthew L. Wald



DAVID MURRAY, JR.

MIENTO
DE CENTRALES
NUCLEARES



1. DURANTE EL DESMANTELAMIENTO de la central atómica Maine Yankee, la cúpula del recinto de contención sigue alzándose sobre los restos de la sala de turbinas, donde la energía del vapor se convertía en electricidad. Los cuatro tubos que abren sus bocas debajo transportaban agua salada entre el mar y el condensador, en el que el vapor se transformaba otra vez en agua. Por encima de ellos, en el exterior de la cúpula, se advierten las tres tuberías que canalizaban el vapor procedente de los tres generadores de vapor del recinto de contención y los tres conductos por donde regresaba el agua para hervir de nuevo. Por la chimenea se emitían de manera controlada los gases radiactivos.

Se exponen en el ayuntamiento de Wiscasset (estado de Maine) las ventajas de unos terrenos industriales, 330 hectáreas, que se espera se hallen pronto disponibles para nuevos usos. Tienen fácil acceso por carretera, ferrocarril y barco, abundan en agua corriente y están conectados ya a la red eléctrica de alta tensión. Distan menos de dos kilómetros del aeropuerto, el gobierno municipal es estable y los habitantes del lugar acogedores.

Tienen un grave inconveniente, sin embargo, nada despreciable: los terrenos son radiactivos. Y en parte lo seguirán siendo hasta más allá de 2023, y quizá hasta mucho después.

En ese lugar, 60 kilómetros al nordeste de Portland, se ubica Maine Yankee, una de las centrales de energía nuclear de uso comercial más antiguas de los Estados Unidos y una de las primeras en clausurarse. Desmantelar una instalación nuclear es una labor ingrata y compleja que no se supo valorar debidamente cuando estas centrales se construyeron.

Maine Yankee, como casi todas las centrales nucleares, era de capital importancia para la economía local. Mientras funcionó, desde 1972 hasta finales de 1996, pagaba el 90 por ciento de los impuestos inmobiliarios percibidos por el municipio y ofrecía los puestos de trabajo mejor remunerados. Además, por ser de las primeras plantas que se desmantelan, dependen de ella muchas esperanzas en el resurgimiento de la industria nuclear. No es que se necesiten técnicas nuevas para desmontarla, pero políticos y expertos han de sopesar ciertas cuestiones, así la magnitud del trabajo de ingeniería a realizar y el nivel de descontaminación que se considere suficiente. (En otros países hay una mayor dependencia de la energía nuclear, pero el programa de EE.UU. es más antiguo y por lo tanto los trabajos de desmantelamiento están allí más avanzados.)

En EE.UU. han funcionado 123 grandes reactores nucleares de uso comercial; siguen activos 103. Algunas de las compañías eléctricas que los explotan han hablado de construir otros nuevos, idea que suscita atención en el plano nacional [*véase* "Nueva generación de la energía nuclear" por James A. Lake, Ralph G. Bennett y John F. Kotek; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2002]. Si la industria está realmente viva (lo cual es discutible, ya que desde 1973 no se han contratado nuevas centrales, salvo algunas que se cancelaron posteriormente), antes de construir plantas nuevas habrá que superar una serie de obstáculos, entre ellos el de desmantelar de manera satisfactoria las centrales antiguas. Se ha de demostrar que los terrenos donde se han ubicado plantas nucleares no están condenados para siempre y pueden ser devueltos al estado de "zona limpia", esencial para casi todo tipo de nuevo uso.

Resumen/*Desmontaje de centrales*

- Los EE.UU. tienen 103 plantas de energía nuclear en servicio, muchas de ellas puntales de la economía de su comarca. Sus propietarios se preparan ahora para el cierre y desmantelamiento final, tarea compleja que no recibió entera atención en la época en que se construyeron.
- La recuperación total de los terrenos implicados (vuelta al estado de "pradera verde") se considera obligada para el resurgimiento de la industria nuclear; el público no aceptará la construcción de nuevas plantas si no se pueden desmantelar satisfactoriamente las ya clausuradas.
- El caso de Maine Yankee, una de las primeras grandes centrales nucleares construida para fines comerciales, permite estudiar las complejidades técnicas, ambientales y económicas del desmantelamiento. En el ámbito nacional queda sin resolver un interrogante: ¿hasta qué extremo debe descontaminarse?

El autor

MATTHEW L. WALD se dedica a cuestiones de política nuclear desde 1979.

Descontaminación en marcha

"Desmantelar" no significa "neutralizar", sino trasladar el material radiactivo de un lugar a otro. En Maine Yankee se han de remover 106.000 toneladas de residuos, de las cuales 88.000 son de hormigón. Algo más de la mitad, 60.000 toneladas, son de material radiactivo. La capacidad generadora de las centrales más recientes supera en un 50 por ciento a la de las antiguas; también será mayor el volumen de sus residuos.

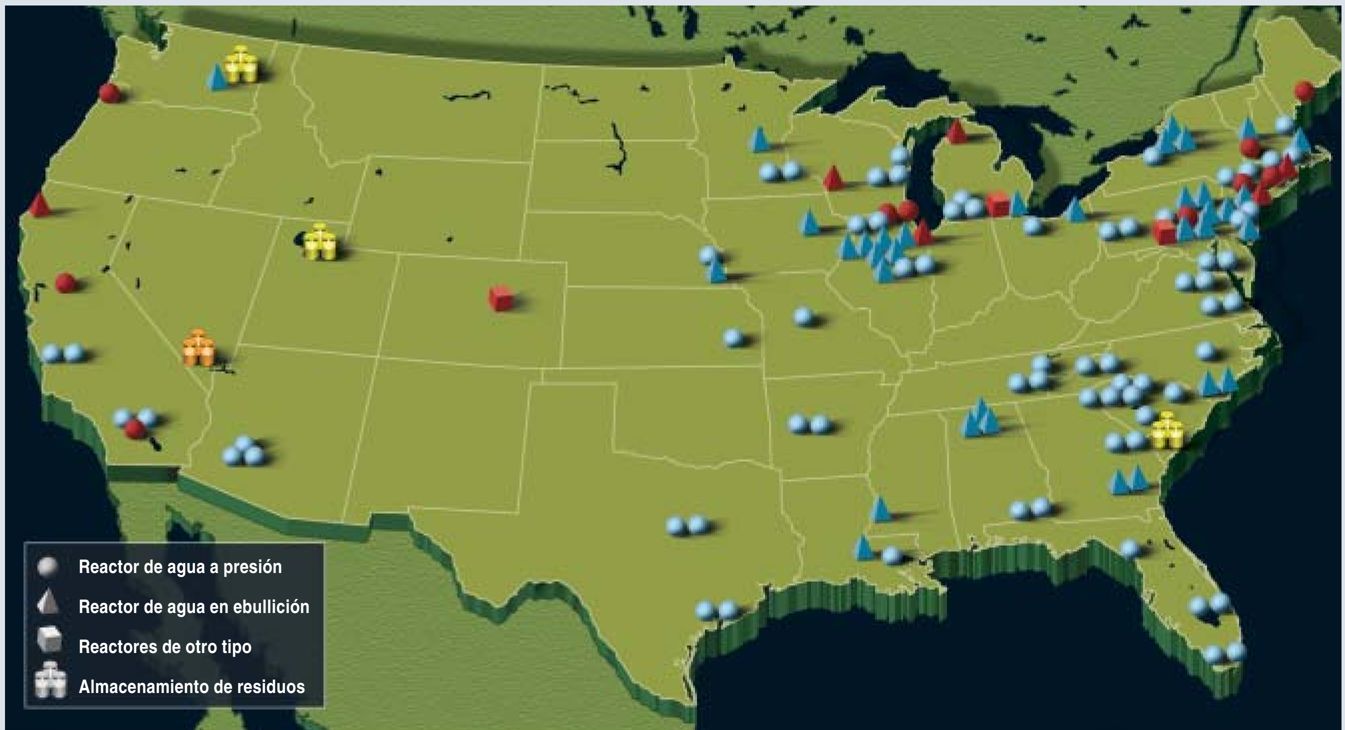
El primer plan pretendía reducir radicalmente los desechos a trasladar. Los propietarios de Maine Yankee querían triturar el hormigón y enterrarlo en los cimientos del edificio, añadiendo luego más hormigón para levantar un monolito. Pero las leyes prohíben allí sepultar material nuclear sin un referéndum previo con el que se consulte a todo el estado. La Comisión Nuclear Reguladora (NRC) todavía considera el enterramiento en el lugar mismo de la central una opción viable, pero hasta ahora no se ha puesto en práctica en ninguna instalación civil. Por tanto, sólo cabe llevarse la central entera, a razón de un tren cargado por semana. Así van apareciendo los riesgos y las ventajas que comporta el desmantelamiento.

Maine Yankee se encuentra en una península, al sur de Wiscasset. Las excavadoras gigantes han demolido los edificios no nucleares y cargado el hormigón y el metal en vagonetas de ferrocarril. Las bateas abiertas parten, bien hacia los basureros nucleares de Carolina del Sur o Utah, bien hacia un vertedero de escombros no nucleares de Niagara County, en el estado de Nueva York.

La estructura de la planta ha quedado al descubierto. La vasta cúpula del edificio de contención destaca sobre el amasijo de los restos de la sala de turbinas, donde la energía del vapor calentado por la reacción nuclear se convertía en par motor que accionaba el generador eléctrico. Se ve claramente el tra-

Situación de las centrales y los vertederos estadounidenses

LOS GRANDES REACTORES NUCLEARES de uso comercial (*en azul*) funcionan sobre todo en el norte y el este de Estados Unidos. Las plantas clausuradas (*en rojo*) serán finalmente desmanteladas; sus desechos radiactivos de bajo nivel podrían enviarse a los vertederos de Barnwell, Carolina del Sur, o Clive, en Utah; en algunos casos se ha utilizado también la reserva nuclear federal de Hanford, estado de Washington. Suponiendo que se apruebe y construya en los plazos previstos, la instalación de almacenamiento de residuos de alto nivel del monte Yucca no se abrirá hasta el año 2010.



**Browns Ferry 1 tiene licencia de funcionamiento, pero en estos momentos no se encuentra activa.*

LAURIE GRACE

yecto que recorrían los fluidos del reactor. Tres conductos, de un tamaño parecido al de una conducción principal de agua, emergen de la pared del edificio de contención. Por ellos circulaba vapor hacia las turbinas a 260 grados de temperatura y presión superior a 70 kilogramos por centímetro cuadrado. Debajo de cada tubería hay otra más ancha, por la que el agua regresaba para ser calentada de nuevo. Se examinaban en su día estos conductos con suma atención, por si había indicios de contaminación radiactiva o fluctuaciones de temperatura o caudal. Ahora están a la intemperie, esperando su turno para ser cargados en las bateas.

La cúpula plantea un problema más arduo. Es un recinto de contención, típico para una gran planta nuclear; cabría en él un gimnasio. Sus muros tienen un espesor de 122 centímetros en la base; se adelgaza hasta 61 centímetros en la cima. Están reforzados por capas concéntricas de barras de acero que pesan en total unas 28.000 toneladas.

Para extraer de la cúpula los principales componentes se utilizó una sierra de diamante. El hormigón que reviste la cúpula es áspero como el pavimento de una calzada. Pero una vez levantada la cara exterior, su tacto es tan suave como el de una mesa lacada. "Dar los primeros cortes en un sistema de seguridad nuclear fue muy difícil; sabíamos que una vez dados, ya no tendría arreglo", dice Michael J. Meisner, principal responsable de la parte nuclear de los trabajos. En una estructura diseñada para que permaneciese hermética incluso bajo sobrepresiones de 3,5 kilogramos por centímetro cuadrado, una tosca puerta de contrachapado cerrada con un candado cede ahora un poco ante las ráfagas de aire.

Aunque parezca raro, una de las tareas más fáciles hasta ahora ha sido el desmontaje de los principales componentes nucleares de la planta, la vasija del reactor y los tres generadores de vapor, que se extrajeron enteros. Con la vasija del reactor, de acero al carbono con revestimiento interior de acero inoxidable, se utilizaron chorros de agua y herramientas cortantes, para trocear el armazón metálico que sujeta el núcleo y canaliza el agua por un sinuoso recorrido. El trabajo se realizó por control remoto y bajo el agua. (Es significativo que los fabricantes nucleares estadounidenses no hayan durado tanto como el ciclo vital completo de las primeras centrales importantes; una empresa francesa, Framatome ANP, ha tenido que aportar las técnicas necesarias para disgregar los grandes componentes metálicos.)

Después se rellenó ("enlechó") con cemento el núcleo del reactor para que sus piezas integrantes corrieran menos riesgo de soltarse en los siglos venideros. La

Disección de una central

UNAS 105.000 TONELADAS DE RESIDUOS de Maine Yankee se transportarán en camiones a tres vertederos, dependiendo de su nivel de radiactividad. Más de la mitad del material –59.000 toneladas— es radiactivo. (En la ilustración se han modificado ciertos aspectos del diseño y estructura de la planta para mayor claridad.)

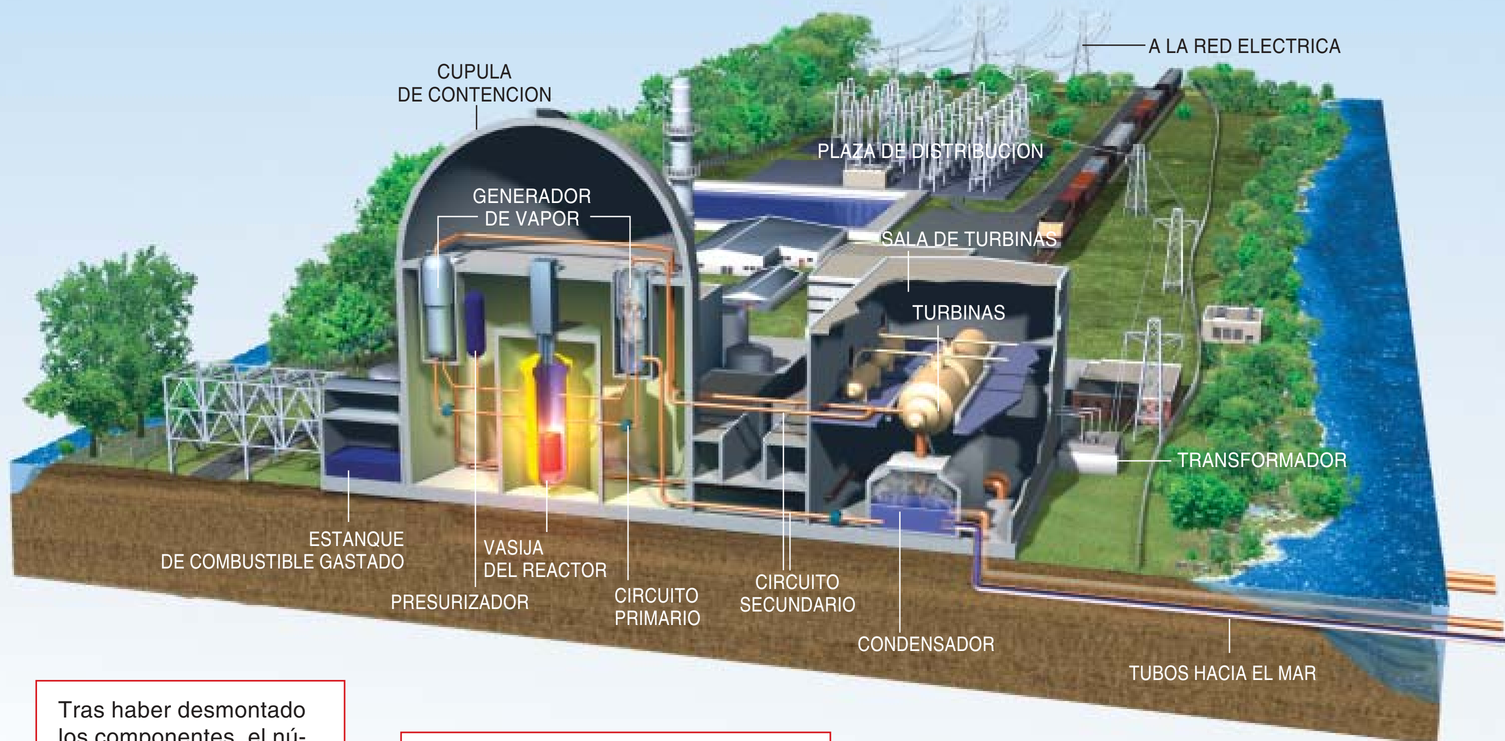


MAINE YANKEE antes de ser clausurada en 1996.

Se practicó una abertura en la pared de la cúpula de contención para poder extraer los componentes. El presurizador y los tres generadores de vapor (para simplificar se representan dos) se enviaron intactos al vertedero de Barnwell.

Las barras de combustible gastado que contienen pastillas ("pellets") de uranio se están trasladando a cubas desecadas para almacenamiento transitorio *in situ* (que puede durar decenios, hasta que se abra una instalación centralizada). Los entresijos —el armazón metálico que sostenía el núcleo y canalizaba el agua por toda la central— llenarán finalmente cuatro de las 64 cubas de Maine Yankee.

La superficie del hormigón que rodea la vasija del reactor fue desbastada para eliminar la capa exterior contaminada.



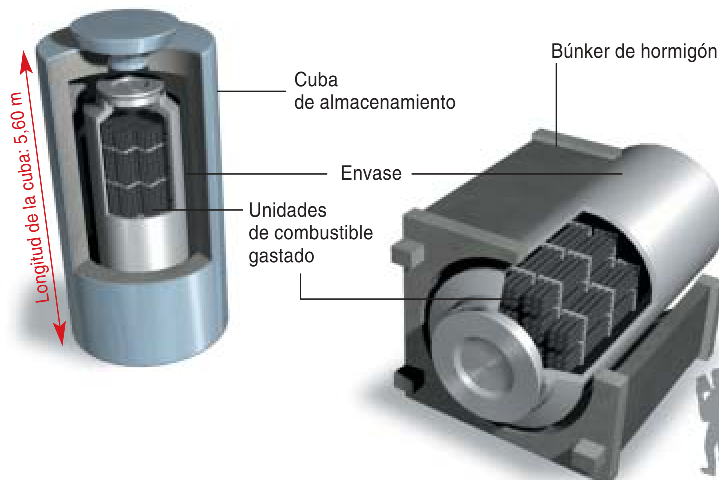
Tras haber desmontado los componentes, el núcleo del reactor fue "enlechado" —rellenado de hormigón— y quedó preparado para el traslado a Barnwell.

Se lavaron con agentes químicos los circuitos primarios para eliminar los depósitos radiactivos. (Maine Yankee tenía tres circuitos de conducciones; para simplificar se muestran sólo dos.)

Los residuos de bajo nivel van a Envirocare, en Clive, Utah. Los materiales no radiactivos se están llevando a un vertedero para desechos de construcción, en el estado de Nueva York.

ALMACENAMIENTO *IN SITU*

Al no existir todavía depósito centralizado para materiales de alto nivel radiactivo, las plantas comerciales de energía nuclear están abriendo instalaciones independientes de almacenamiento del combustible gastado, donde, en grandes cubas, se encerrarán sus residuos. En algunas plantas, estos contenedores de acero y hormigón descansan horizontalmente (*a la derecha del todo*), pero en Maine Yankee se mantienen verticales, cubiertos por terraplenes de tierra, en una parcela de 2,4 hectáreas.



CORTESIA DE MAINE YANKEE (*fotografía*); DAVID FIERSTEIN (*ilustración superior*); DON FOLEY (*ilustración inferior*)

vasija quedó suspendida en alto, preparada para ser transportada en barcaza a un vertedero de residuos de bajo nivel situado en Barnwell, Carolina del Sur. Otros materiales de actividad menor se llevan a Envirocare, en Clive, Utah, unos 140 kilómetros al oeste de Salt Lake City. Para algunos desmantelamientos se ha utilizado también un tercer vertedero, situado en la reserva nuclear del gobierno federal en Hanford, estado de Washington. El traslado a un lugar centralizado beneficia al medio ambiente porque facilita la conservación y vigilancia del material.

Los entresijos del reactor acabarán finalmente donde acabe el combustible nuclear (los "pellets" de uranio apilados en barras delgadas como lápices). En teoría, será en el monte Yucca, en Nevada, donde el Departamento de Energía piensa construir un gran silo subterráneo de residuos nucleares. Sea como fuere, estos materiales se guardarán mientras tanto dentro de cuatro grandes cubas de acero y hormigón, junto a otras 60 llenas de combustible gastado. Se almacenan en un terreno de 24.000 metros cuadrados, la Estación Independiente de Almacenamiento de Combustible Gastado. Se asemeja a otras de centrales de todo el país.

En la de Maine Yankee, las cubas de seis metros de altura están protegidas por terraplenes, vallas electrificadas, cámaras en circuito cerrado y un edificio de vigilancia de imponente aspecto. Si el Departamento de Energía mantiene el último plazo que ha dado de finalización del depósito del monte Yucca y recepción allá de los residuos —no es decir poco—, el terreno de la central seguirá utilizándose como lugar de depósito unos 20 años. La verdad es que se espera que el plazo sea bastante más largo.

Aunque la Comisión Nacional Reguladora se niegue a certificar las cubas de almacenamiento con carácter indefinido, no está claro qué motivo podría haber para que perdieran su seguridad en, al menos, los próximos 100 años, a no ser por una subida mundial del nivel de los mares o quizá por una agresión terrorista. Los críticos afirman que son vulnerables a posibles ataques. Ciertas propuestas sugieren encerrar las cubas en la cúpula; otros responden que no hay allí espacio suficiente. Los expertos nucleares sostienen que sería difícil romper las cubas y que el material que encierran, de temperatura suficientemente baja para no necesitar refrigeración mecánica, no tendería a esparcirse en forma de aerosol sobre grandes extensiones. La NRC considera seguros estos recipientes, pero en septiembre de 2002 ha impuesto nuevas —y secretas— normas de seguridad a los mismos.

¿Qué se entiende por "limpio"?

El combustible es un problema obvio. Pero muchos otros componentes de la planta crean dificultades más sutiles. Se han efectuado 14.300 mediciones, más de la mitad de ellas en zonas donde no se esperaba encontrar contaminación. Por otro lado, había elementos que apenas se habían probado —los sistemas de refrigeración del reactor y de refrigeración de emergencia del núcleo, o el sistema químico de volumen y control—, porque ya se suponía que estaban contaminados. Se realizó un muestreo desde un vehículo que recorría el terreno a menos de ocho kilómetros por hora; se enviaron numerosas muestras a laboratorios externos para conseguir análisis más sensibles que con los detectores Geiger-Mueller.

La radiación residual permitida por los reglamentos del estado y federales era tan débil que los responsables de la planta concluyeron que habrían de determinar el nivel de fondo normal, no fuesen a acabar suprimiendo los núclidos radiactivos que estarían allí aun sin haber construido la central. (Una fuente importante de la radiación de fondo, en su mayor parte cesio 137, procede de las pruebas nucleares en la atmósfera.) Para ello fueron a la sede de uno de los propietarios de la central, la Compañía Eléctrica Central de Maine, en Augusta, y allí tomaron muestras de la radiactividad beta en el hormigón pintado y sin pintar, el baldosín cerámico y el asfalto.

Mientras se intentaba descontar la radiación de fondo debida a fuentes naturales, también se buscaron otras de origen artificial. Merced a un acuerdo con un grupo ecologista local, se invitó a antiguos trabajadores de Maine Yankee a que dijeran en qué lugares se habían tirado o derramado materiales. La Oficina General de Cuentas, brazo investigador del Congreso, cita esta iniciativa entre los factores que favorecen un desmantelamiento rápido.

Los reactores de agua a presión, como el de Maine Yankee, retienen en múltiples capas los materiales radiactivos, pero siempre es posible que algunos escapen y aparezcan en lugares insospechados. Así ha sucedido con el cobalto 60 detectado en el campo de béisbol de los empleados; llegó hasta allí quizá con la nieve que se quitaba de los alrededores de la central.

En un reactor de energía nuclear se producen dos tipos de materiales radiactivos: de fisión y de activación. Predominan los de fisión. Las plantas nucleares escinden el uranio, cuyo nivel de radiación es tan bajo que los técnicos lo manipulan sólo con guantes de algodón. Pero el uranio se divide en una docena de grandes tipos de fragmentos, que a su vez degeneran en otros. Estos fragmentos, y muchos de los productos de la desintegración, son muy inestables; desprenden fácilmente energía —en forma de rayo gamma, de partícula alfa o beta, o a veces de rayo gamma y partícula— para volver al equilibrio. El combustible está repartido en pastillas ("pellets") cerámicas envueltas por tubos metálicos y bañadas en agua ordinaria. Pero durante el funcionamiento la cerámica se resquebraja, y en varias plantas, entre ellas la de Maine Yankee, los tubos presentan fugas que dejan entrar productos de la fisión en el agua de refrigeración. Muchas de estas partículas radiactivas pasan a revestir el interior de la vasija o de las conducciones.

El agua que circula alrededor del combustible en una central de agua a presión pasa por gigantescos intercambiadores de calor —generadores de vapor—, donde fluye por tuberías metálicas de paredes delgadas; a través de éstas se transmite el calor al agua limpia del exterior, que hierve y genera vapor que va a la turbina. También estas tuberías tenían fugas en Maine



Yankee, y, como suele ocurrir en las plantas industriales, a veces se vertía agua contaminada a los sumideros.

Para deshacerse de estos productos de la fisión, los técnicos de la central lavaron el sistema de conducciones con agentes químicos, reduciendo a una quinta parte la radiación en los circuitos de refrigeración primarios. La superficie del hormigón se descontaminó "desbastando" o arrancando el primer centímetro o centímetro y medio de su espesor; el polvo resultante fue aspirado al exterior y conducido a través de un sistema de filtrado de partículas aéreas de gran eficacia.

Pero existe una segunda clase de contaminación: la causada por los productos de activación. Aunque no hubiera en absoluto fugas en los tubos ni el combustible, los neutrones procedentes de la fisión del uranio chocan con los átomos, que, al absorberlos, en lugar de escindirse, se tornan inestables, o radiactivos. Se han encontrado rastros evidentes de productos de activación hasta 60 centímetros dentro del hormigón. Al cabo de los años de funcionamiento, los entresijos del reactor suelen haberse transformado tanto por la irradiación neutrónica que han de ser tratados como residuos de alto nivel.

Según la NRC, el cobalto 60 es uno de los productos de activación dominantes y una fuente importante de radiactividad fuera del combustible. Se origina por la interacción de los neutrones con el cobalto 59 o el níquel, componentes ambos de diversas aleaciones metálicas. El cobalto 60 tiene una propiedad favorable: su semivida —período en el que la mitad del material cede sus partículas y rayos gamma y se transforma en níquel 60 no radiactivo— es de 5,27 años sólo. En teoría basta con esperar; dentro de 21 años habrán desaparecido 15/16 del cobalto 60.

2. EN UNA RETICULA de 24 celdas se guardan paquetes de combustible radiactivo de 3,70 metros de largo (*arriba*). Los paquetes van envueltos en acero de 6,35 centímetros de espesor y se depositan en un silo de hormigón de 5,87 metros de alto con paredes de 72 centímetros de grosor (*derecha*).

Pero en Maine Yankee y muchas otras centrales urge abreviar el proceso. Un motivo es el coste, que tiende a crecer con el tiempo. Además, sobre los proyectos nucleares se cierne la amenaza de las modificaciones de las normas. Igual que los cambios de reglamentación provocaron grandes retrasos en la construcción de las centrales, también podrían retrasar su desmontaje. Otra preocupación es la de poder disponer de depósitos para desechos de bajo nivel cuando llegue el momento. Existen ahora tres en Estados Unidos, y si alguno de ellos cerrase y no se abrieran otros nuevos, los precios sufrirían un vertiginoso ascenso o sería imposible la retirada de los residuos. Los costes de eliminación ya ascienden hoy a unos 20.000 euros por metro cúbico.

Las normas ya han cambiado desde el cierre de Maine Yankee; las que regulan la libre disposición de una propiedad ahora son más exigentes que en 1997. La Comisión Nacional Reguladora establece un valor "tan bajo como razonablemente sea posible", pero no mayor de 25 milirem por año de ra-

MATTHEW L. WALD

diación adicional (sobre el nivel de fondo en esa zona) para el individuo medio de un grupo vulnerable. La Agencia de Protección Ambiental impone a los lugares químicamente contaminados que la probabilidad de que se desarrolle un caso adicional de cáncer sea de una entre un millón; equivale a restringir la radiación a 15 milirem por año, de los cuales no más de 4 milirem pueden proceder del agua del subsuelo.

La unidad milirem, o milésima de rem, es un tanto extraña. No se trata de una unidad directa de radiación, sino de daño biológico. Deriva del roentgen, que mide el poder ionizante de los rayos gamma. Pero los tres tipos principales de radiación —alfa, beta y gamma— difieren en potencia biológica; el rem, abreviatura de "Roentgen Equivalent in Man" (equivalente al roentgen en el hombre), integra los tres en un solo número.



La NRC sostiene que su norma protege suficientemente; por el momento es la norma federal. Sin embargo, pierde valor con rapidez ante las crecientes exigencias de los estados, que en definitiva son los árbitros de la sanidad y la seguridad física. En 2000, el parlamento de Maine rebajó el límite a 10 milirem, con no más de 4 milirem debidos al agua del subsuelo. Massachusetts, Nueva York y Nueva Jersey han dado pasos similares, aunque estos dos últimos estados no tienen hasta el momento centrales a punto del desmantelamiento total.

La cifra que se establezca será un parámetro esencial porque la limpieza se complica más a medida que se endurecen las normas. Cuando se trata de radiaciones, parece que casi ninguna es lo bastante rigurosa.

Hay quien cree que la legislación de Maine ha sentado un mal precedente. "Deberíamos fijar normas de descontaminación con una sólida base científica, que protejan la salud y la integridad física", afirma Marvin S. Fertel, vicepresidente del Instituto de Energía Nuclear, la patronal del ramo. "La norma de Maine va mucho más allá de ese objetivo; no es una buena manera de utilizar los recursos de la sociedad."

James D. Werner, que fuera director de gestión a largo plazo del Departamento de Energía en la época de Clinton, observa que las exigencias de descontaminación nuclear se discuten "en un mundo de ideólogos. Hay quien dice que esos terrenos son tan seguros que sus residuos se podrían untar en el pan, mientras otros exclaman que matan a los niños o, al menos, que espantan a los inversores. Se los ve como lugares de mal fario. Provocan respuestas emocionales, no racionales. Lo pasaríamos muy mal si nos comportásemos así con las conducciones de gas o los cables eléctricos".

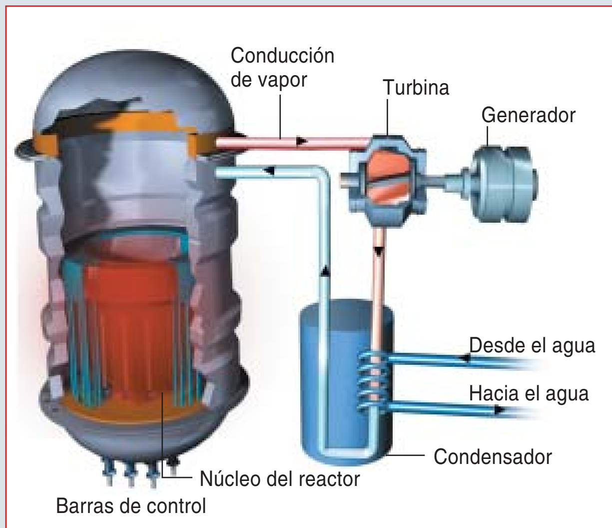
El gerente interino del ayuntamiento de Wiscassett, más cercano al sentimiento popular, dice en cambio: "Yo creo que cero es el único nivel aceptable".

Es discutible que 25 milirem y 10 milirem tengan efectos distintos. Peor todavía, hasta se desconoce casi del todo la importancia de una radiación de 25 milirem. La idea de que esta dosis afecta a la salud es parte de una hipótesis esencial, aunque no comprobada, sobre la exposición a las radiaciones: que a diferencia de muchos riesgos químicos no tiene un umbral por debajo del cual sea inocua. El modelo matemático en que se basan las normas de seguridad parte del supuesto de que un determinado aumento de la exposición radiactiva, 10.000 rem-persona de dosis colectiva, producirá de uno a ocho cánceres fatales se aplique como se aplique. Podrían ser el resultado de someter 10.000 personas a un rem cada una, o 100.000 personas a una décima de rem por cabeza, o un millón de individuos a una centésima de rem cada uno. Contrasta con las dosis individuales; en ausencia de tratamiento médico, una dosis cercana a los 350 rem causará en la mitad de los casos la "muerte rápida" de quien la reciba, frente a los "cánceres latentes" provocados por las dosis colectivas.

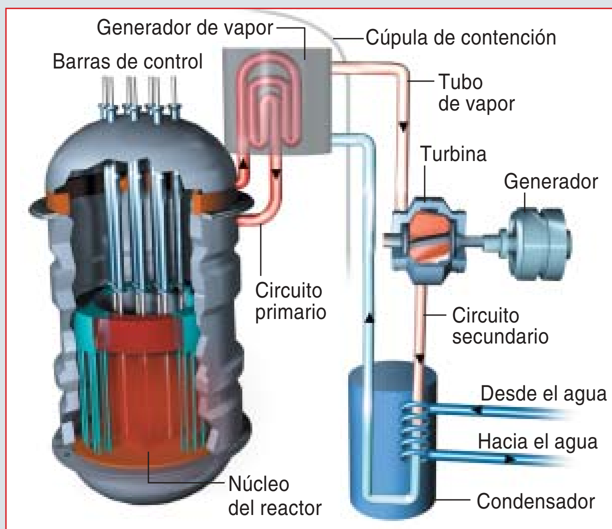
Por otro lado, los físicos sanitarios sostienen que no se han demostrado efectos dañinos por debajo de los 10 rem. Los efectos agudos, las náuseas o la caída del cabello, no aparecen mientras el organismo no haya absorbido decenas de rem.

En ebullición o a presión

DOS TIPOS DE REACTORES funcionan en EE.UU.: 69 de los 103 reactores activos son de agua a presión y el resto, de agua en ebullición.



EL REACTOR DE AGUA EN EBULLICION hace hervir agua en su interior y utiliza el vapor para mover una turbina, igual que en una central térmica de carbón. Pero el vapor que emite el reactor es ligeramente radiactivo. Se obtiene un rendimiento del combustible un poco superior, lo que se consideró importante a la hora de diseñar estos reactores; ahora, sin embargo, el coste del uranio se ha reducido mucho.



EL REACTOR DE AGUA A PRESION calienta agua en su interior y la hace pasar por un intercambiador de calor, el generador de vapor. El agua del reactor circula por miles de tubos de pared delgada. En el exterior de esos tubos hay agua limpia, no radiactiva, que, al entrar en ebullición, genera vapor para la turbina. De este modo el agua radiactiva queda confinada en el edificio del reactor y no entra en la sala de turbinas (a no ser que el generador de vapor tenga fugas, lo que sucedió en Maine Yankee y también en otras centrales).

DON FOLEY

Hay otros criterios aplicables. Por ejemplo, el gobierno federal estima en torno a los 360 milirem la dosis anual de radiación que recibe un estadounidense medio, contando todas las fuentes, incluidos los rayos cósmicos, el gas radón y los rayos X médicos. Esto significa que los 25 milirem que origina un reactor nuclear desmantelado incrementarían esa dosis anual en una pequeña proporción (algo menos de la dosis de un mes). El mismo aumento de radiación experimentaría un residente de Wiscasset, a nivel del mar, que se trasladara a Denver (a 1600 metros de altitud), donde la atmósfera le protege menos de los rayos cósmicos. Estas diferencias en la radiación de fondo natural explican que el límite de la exposición a radiaciones se establezca en términos de dosis *adicionales* debidas a una cierta actividad humana, no de dosis totales. Si no, una norma estricta podría prohibir la residencia en Denver. El Laboratorio Nacional de Los Alamos estima que la radiación cósmica a nivel del mar es de 25 a 30 milirem por año, y de 90 milirem a 3000 metros de altitud.

En contraste con el máximo de 25 milirem por año que desprenden los reactores desmantelados, se permite que las plantas nucleares activas expongan a quienes residen en sus cercanías a radiaciones de hasta 100 milirem por año, aunque en la práctica estos valores estén lejos de alcanzarse. Los trabajadores de las centrales nucleares tienen un límite de cinco rem por año, aunque en la explotación se intenta rebajarlo a dos rem y la mayoría de los empleados reciben dosis mucho menores.

Además, para reducir la exposición del público a las radiaciones durante el proceso de desmantelamiento, los trabajadores absorberán dosis superiores. El plan de Maine Yankee prevé para el transcurso de las obras una dosis de 1115 rem-persona. Se ha de comparar con los 440 rem-persona del año en que se cargó combustible en el reactor por última vez.

Por baja que pueda parecer la cifra de 25 milirem, es difícil que una persona corriente llegue a recibir ni siquiera esa cantidad de radiación. La NRC estima que la absorbería un agricultor que cultivase hortalizas en el propio lugar afectado y las regara con agua de un pozo perforado en el punto más contaminado.

Pero se desaconsejaría de plano el uso agrícola del terreno; la agricultura paga pocos impuestos y el solar tiene gran valor como terreno industrial. Pocos alimentos de cosecha propia se consumen en Maine. Una persona que trabajara en el terreno de la central ocho horas diarias y 250 días al año, que consumiera alimentos procedentes de otros lugares y bebiera el agua de la ciudad, difícilmente sufriría una radiación adicional mayor que la absorbida por un pasajero en un solo vuelo transpolar. Sin embargo, para la liberación sin restricciones del suelo se exige que el suelo esté en buenas condiciones para cualquier uso imaginable.

La norma es tan rigurosa, que la verificación de su cumplimiento plantea un problema técnico. “No es posible medir; hay que trabajar con modelos”, afirma Eric T. Howes, director de asuntos públicos y estatales de la planta de Maine Yankee. La radiación suele

evaluarse midiendo la emisión de energía en una hora; para determinar las emisiones en milirem (milésimas de rem) por año se requiere medir las emisiones hora tras hora en millonésimas de rem.

La complejidad crece además porque los distintos isótopos no persisten el mismo tiempo. Por ejemplo, en el momento de clausurarse la central uno de los más abundantes era el cobalto 60, con sus cinco años de semivida. Más tarde, la preocupación dominante será el cesio 137, cuya semivida es de 30,2 años. Quedarán, por último, como fuentes radiactivas vestigios de isótopos cuya vida media se extiende a miles de años.

Pagar la factura

Los responsables se resistieron a decir cuánto tendrían que pagar de más para adherirse a las endurecidas normas de Maine, como si la idea les molestase. Pero la Oficina General de Cuentas cifra entre 25 y 30 millones de euros el coste adicional para Maine Yankee. En enero de 2002 se evaluó en más de 600 millones de euros el coste total del desmantelamiento de esta central. De esa cantidad corresponderían unos 80 millones al enterramiento de residuos de bajo nivel; los embalajes y transportes se llevarían otros veintitantos millones. Los gastos en otras plantas deberían ser comparables. Cifras asombrosas si se comparan con los 231 millones de dólares que costó construir la planta en los años sesenta y setenta.

El Instituto de Investigaciones sobre Energía Eléctrica estima que el coste de desmantelar una planta que haya funcionado 40 años será de 0,2 céntimos por cada kilowatt-hora producido en ese período. El consumo se paga hoy a entre ocho y nueve céntimos por kilowatt-hora; en comparación, ese coste unitario extra parece pequeño. Sin embargo, resulta una cifra considerable para una compañía que ha de decidir el tipo de planta eléctrica a instalar.

No siempre importó tanto el coste de desmantelamiento. Era una obligación comunitaria; el único problema se daba entre generaciones sucesivas de consumidores: bien la empresa eléctrica recaudaba de sus clientes forzosos dinero suficiente para el desmantelamiento, bien pasaba esos costes a futuros usuarios que ni siquiera habían nacido en los días en que se recogían los beneficios de la planta.

Hoy día las centrales generadoras cambian de dueño repetidas veces; alguno ha de ser el último. En un informe de diciembre de 2001, la Oficina General de Cuentas lamentaba que la Comisión Nacional Reguladora no prestase suficiente atención a la capacidad financiera de las entidades que adquieren centrales. La Comisión negó la acusación, si bien ciertos propietarios no eran ya aquellos a quienes concedió la licencia de explotación. Pero el paisaje financiero ha cambiado mucho; uno de los actuales propietarios de centrales es Enron, la gran empresa energética quebrada tras un escándalo monumental. Se hizo con una porción mayoritaria del clausurado, y hoy ya desmantelado, reactor Trojan al comprar, en una operación que suscitó una campaña de protesta, la compañía eléctrica Portland General Electric, de Oregón.

Al final, no faltó el dinero en Maine Yankee porque la Comisión Federal Reguladora de la Energía permitió que se facturase a los antiguos clientes.

Cuesta predecir cuándo se producirá el cierre definitivo de numerosas centrales. Originalmente, recibían licencia para funcionar 40 años a partir de la expedición de su permiso de construcción. En algunos casos, la edificación se retrasó tanto que la Comisión Nacional Reguladora permitió que el origen del plazo se trasladara al momento de iniciar realmente la explotación. Luego empezó a ofrecer prolongaciones de licencia de 20 años; al parecer, las solicitan la mayoría de las 103 plantas en servicio.

Pese a todo, la perduración económica de los viejos reactores es incierta. Se asemejan a los coches antiguos, a los que merece la pena cambiarles el aceite, pero no la transmisión. Maine Yankee fue dada de baja porque acusaba defectos, cada vez más claros, en el cableado y los generadores de vapor. En una central gemela, Yankee Rowe, en Massachusetts, el material de la vasija del reactor se había vuelto quebradizo. Esta circunstancia, causada por años de bombardeo neutrónico, vuelve vulnerable el reactor al choque térmico: podría resquebrajarse si el sistema de emergencia de refrigeración del núcleo vertiese agua fría. No se sabía hasta qué punto estaba afectado el material, pero la junta de propietarios —una serie de compañías eléctricas que en parte coinciden con las de Maine Yankee— decidió que no valía la pena gastar dinero en averiguarlo.

Es probable que las centrales que han obtenido una prórroga de 20 años no agoten ese plazo. Tendrían que recuperarse en un período muy breve las inversiones requeridas en los últimos años para mantener un servicio continuo.

Tampoco hay certeza en cuanto al nivel de desmantelamiento requerido. Hay opciones menos drásticas que volver a una verde pradera. Como ejemplo: al clausurar el reactor Pathfinder, en Sioux Falls, Dakota del Sur —una central antigua, con un tamaño que no es ni una décima del de Maine Yankee—, la Northern States Power instaló en su lugar un generador de vapor convencional, al principio alimentado por carbón y después por gas natural, para propulsar la turbina. La Public Service Company de Colorado hizo lo mismo con el reactor Fort St. Vrain; montó unas turbinas de gas natural y aprovechó su calor residual para mover la antigua turbina de la central nuclear con vapor. En ambos casos, sólo se retiraron los componentes nucleares.

A las centrales Indian Point 1, del estado de Nueva York, Millstone 1, de Connecticut, Dresden 1, de Illinois, y Peach Bottom 1, de Pennsylvania, todas ellas contiguas a reactores todavía en servicio, simplemente se las vació de combustible, se las clausuró y se las dejó donde estaban; serán desmanteladas más tarde. Así sucedió también con Three Mile Island 2, la central próxima a Harrisburg donde se fundió el núcleo del reactor en marzo de 1979. Pero Maine Yankee no es la única central sometida a descontaminación. Yankee Rowe y Connecticut Yankee siguen ese mismo pro-

El desmantelamiento de Vandellós I

En 1989, tras un incendio originado por una turbina —un incidente de nivel 3, es decir, tal que si se hubiese producido alguna anomalía más, nada podría ya haber impedido un accidente nuclear grave—, se clausuró la central de Vandellós I, situada en la costa de Tarragona. El desmantelamiento corre a cargo de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), empresa pública constituida por el parlamento español en 1984. Para cubrir los gastos en que incurre con la gestión de los residuos generados por las empresas productoras de energía, percibe un 0,865 % de la factura de la luz ordinaria (un 2,102 % en el caso de los consumidores cualificados). El primer nivel del desmantelamiento, durante el cual se vació de combustible el reactor, se extendió de 1990 a 1997. El segundo nivel, consistente en la demolición de los edificios —entre ellos la nave del reactor—, la recuperación del 85 % del terreno y la construcción de una protección prismática de acero alrededor del cajón de hormigón del reactor, estaba concluido en un 97 % a finales de 2002. El tercer nivel será de latencia: el reactor permanecerá encerrado en su estructura de protección 25 años; para cuando hayan transcurrido, la radiación se habrá reducido a un 5 % y se procederá a su desmantelamiento. Mientras, el gobierno aspira a que se instale en el solar contiguo al reactor latente —con la línea de ferrocarril en medio— el reactor experimental de fusión ITER, un proyecto internacional.

Las obras han generado hasta ahora 7200 toneladas de materiales de partes no nucleares de la central y 8900 de zonas afectadas por la radiación; de éstas, 7800 se están “desclasificando” para su uso ordinario y 1100 son residuos de baja y media actividad enviados al cementerio nuclear de El Cabril, en Córdoba, junto a la sierra Albarrana. El combustible se ha estado reciclando en Francia —le extraen el material fisible— y se guardará allí durante un tiempo, pero deberá regresar a España para su almacenamiento definitivo, sin que esté claro dónde. Una partida de acero de baja actividad se remitió a Estados Unidos para que fuera reciclada, pero en noviembre de 2002, rechazada allí, recalaba de vuelta en el puerto de Cádiz.

ceso. El reactor de Shoreham, en Long Island, que funcionó sólo unos días, ha sufrido una limpieza, pero muchas de sus estructuras siguen en pie.

Determinar qué parte de los residuos ha de eliminarse plantea otro interrogante. La Comisión Nacional Reguladora anunció el 6 de noviembre de 2002 que iba a establecer una norma para el reciclaje del material contaminado. Sus partidarios aducen que los metales ligeramente radiactivos serían muy útiles para armar el hormigón, pero a otros les preocupa que puedan acabar en correctores dentales infantiles o cremalleras de pantalones. Cuando el Departamento de Energía intentó a mediados de los años noventa rescatar níquel y otros metales de sus plantas nucleares, la protesta pública fue tan unánime que el programa se dio por terminado en 2000.

Y el coste final dependerá, en parte, del tiempo que tenga que esperar la industria para la retirada definitiva del combustible nuclear de alto nivel. Mientras no se haya resuelto esta cuestión, habrá en la costa de Maine una gran parcela de hormigón donde no cuajará la nieve. Debajo están las cubas de almacenamiento de combustible gastado, que generan hasta 17 kilowatt cada una, tanto como una docena de secadores de pelo. Cada cuba de hormigón, con paredes de 72 centímetros de grueso, aloja un recipiente de acero sellado de 63,5 milímetros de espesor, que encierra una retícula de 24 cavidades, cada una capaz de albergar un paquete de combustible de 3,70 metros de largo. Se comenzó a rellenar las cubas en el pasado agosto y no se terminará hasta bien entrado 2003. Cuando finalice este trabajo, los trabajadores podrán demoler el estanque del combustible gastado, último sistema funcional restante de la vieja central.

Durante todo el debate sobre el desmantelamiento de Maine, los adversarios exigían que el proceso se realizara sin interrupciones, condición que lo encarecía y dificultaba. Sin embargo, los propietarios de la central han demostrado que ese requisito es técnicamente alcanzable.

Las normas de descontaminación rigurosas pretenden que, sean cuales fueren las conclusiones futuras sobre posibles daños, apenas queden cantidades de radiación apreciables en los antiguos emplazamientos de las centrales desmontadas.

Bibliografía complementaria

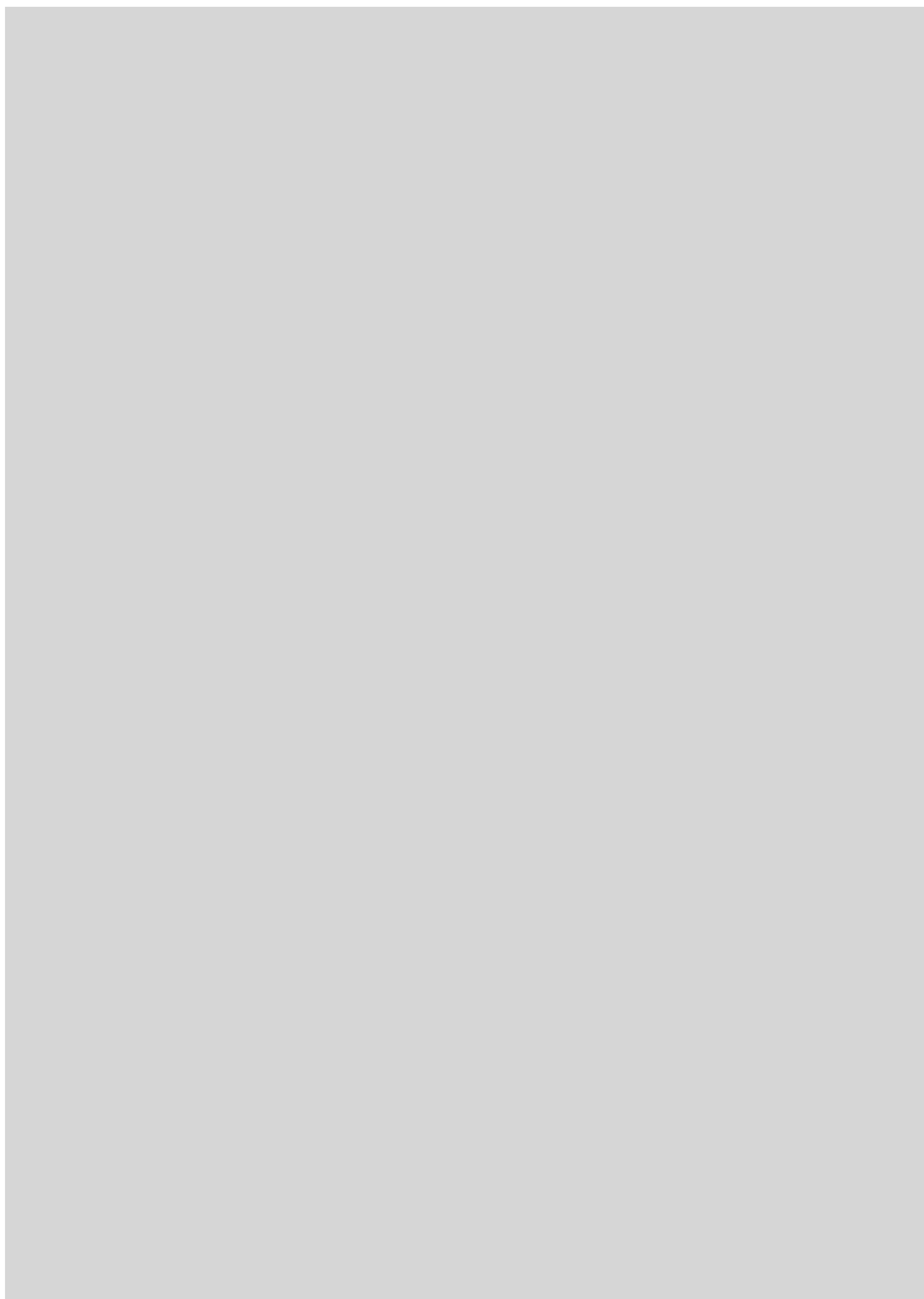
MAINE YANKEE LICENSE TERMINATION PLAN: www.maine-yankee.com

MULTI-AGENCY RADIATION SURVEY AND SITE INVESTIGATION MANUAL, norma federal para la medición de la contaminación ambiental: www.epa.gov/radiation/marssim (incluye las FAQ y otro material de introducción además del propio manual)

ASOCIACIÓN NUCLEAR MUNDIAL, relación de los estados de desmantelamiento: www.world-nuclear.org/wgs/decom/portal_atoz.htm

COMISIÓN NUCLEAR REGULADORA DE EE.UU., FAQ on Decommissioning, NUREG 1628: www.nrc.gov/reactors/decommissioning/faq.html

INFORME DE LA OFICINA GENERAL DE CUENTAS: *Nuclear Health and Safety: Consensus on Acceptable Radiation Risk to the Public is Lacking*, RCED-94-190: www.gao.gov

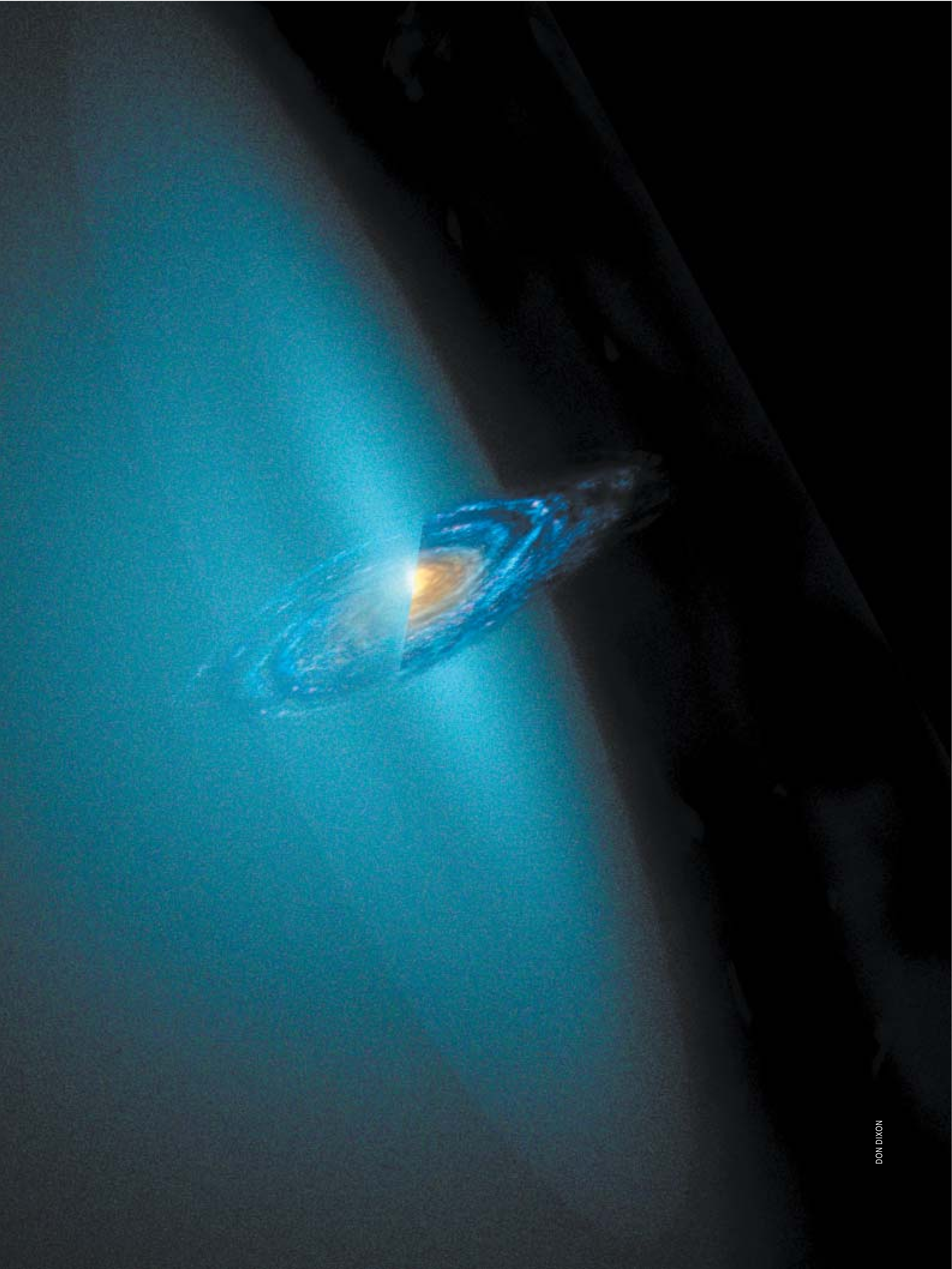


La búsqueda de la materia oscura

Suele concebirse la materia oscura como algo remoto. Pero no la conoceremos de verdad hasta que no la hayamos observado en la Tierra

David. B. Cline

1. SI SE PUDIERA VER LA MATERIA OSCURA, la Vía Láctea tendría un aspecto muy distinto. El conocido disco en espiral que alberga la mayoría de las estrellas estaría envuelto en una densa niebla de partículas de materia oscura. Se cree que esa niebla oscura pesa diez veces más que el disco y que su diámetro decuplica casi también el de la Galaxia.


DON DIXON

El universo que nos rodea no es como parece. Las estrellas constituyen menos del 1 por ciento de la masa del universo; el gas difuso y otras formas de materia ordinaria, ni el 5 por ciento. Los movimientos de la materia visible descubren que es un mero residuo en un mar invisible de material desconocido. Sabemos poco de este mar. Las palabras con que describimos sus componentes, "materia oscura" y "energía oscura," expresan, en realidad, nuestra ignorancia.

Durante setenta años se han reunido pruebas circunstanciales de la existencia de materia oscura. Que ésta es real, casi todos lo aceptan. Pero las pruebas circunstanciales no acaban de satisfacer. No descartan otras posibilidades; no descartan unas leyes de la física modificadas [*véase* "¿Existe realmente la materia oscura?", por Mordehai Milgrom; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 2002]. Tampoco nos enseñan mucho acerca de las propiedades que pueda tener. La materia oscura se agrupa y proporciona un áncora gravitatoria a galaxias y a estructuras mayores, los cúmulos galácticos; poco más sabemos. Casi con toda certeza consiste en algún tipo de partícula elemental aún no descubierto. La energía oscura, a pesar de la semejanza de su nombre, que induce a confusión, es una sustancia diferente, que no se añadió al conjunto hasta 1998. Se distribuye uniformemente por el espacio, ejerce una presión negativa y acelera la expansión del universo.

En última instancia, deberá informarnos de los detalles de estos oscuros componentes no la astronomía, sino la física de partículas. En los ocho últimos años las dos disciplinas han juntado sus recursos; sus especialistas se han venido reuniendo, así en los "Simposios sobre fuentes y detección de la materia oscura y la energía oscura en el universo"; el próximo tendrá lugar en febrero de 2004 en Marina del Rey, California. Persiguen estrategias para encontrar y estudiar la materia oscura por medio de las mismas técnicas que han tenido tanto éxito en el análisis de positrones o neutrinos. En vez de inferir su presencia a partir de la observación de objetos distantes, se quiere dar con la materia oscura aquí en la Tierra.

La búsqueda de las partículas de la materia oscura se cuenta entre los experimentos de la física más difíciles que nunca se hayan intentado (la de las partículas de la energía oscura es aún más inabordable y ha sido dejada de lado, por lo menos de momento.) En el primer simposio, celebrado en febrero de 1994, los participantes expresaron una casi total falta de confianza en que un detector de partículas de un laboratorio terrestre pudiera captar la materia oscura. La precisión de los mejores no llegaba a ser ni una milésima de la necesaria para captar los hipotéticos tipos de partículas oscuras. Pero desde entonces se ha multiplicado por mil y los constructores de instrumentos esperan multiplicarla de nuevo por mil. Más de quince años de investigación y desarrollo de los métodos de detección finalmente están dando frutos. Puede que pronto sepamos cómo es el universo. Se demostrará que la materia oscura es real o, por el contrario, las teorías en que se basa la física moderna deberán darse por vencidas.

Resumen/*Detectores de materia oscura*

La mayoría de los astrónomos piensa que los cielos están llenos de materia oscura, pero sus observaciones son demasiado imprecisas, no proporcionan una prueba inequívoca, ni miden las propiedades detalladas de la supuesta materia. Los físicos de partículas intentan aclarar la situación construyendo detectores con los que pueda buscarse la materia oscura que atraviesa la Tierra.

- Las partículas de materia oscura, aunque raras veces interaccionan con los átomos ordinarios, en ocasiones lo hacen. Cuando rebotan en un núcleo atómico, el núcleo retrocede, choca con los átomos que lo rodean y cede energía en forma de calor o de luz.
- El quid del problema: distinguir esta cesión de energía de efectos debidos a procesos más prosaicos, como serían las desintegraciones radiactivas. Parece probable que efectos así sean la verdadera causa de la única detección de materia oscura que ha sido anunciada hasta la fecha.

PARTICULAS DE MATERIA OSCURA

COLISION CON UN ATOMO

DESINTEGRACION RADIACTIVA

SLIM FILMS

Neutrinos y neutralinos

¿De qué clase de partícula puede estar hecha la materia oscura? La observación y la teoría astronómicas proporcionan algunas pistas generales. No puede componerse de protones, de neutrones o de nada que hubiera estado alguna vez formado por protones o neutrones, a la manera de grandes estrellas que se convirtieran en agujeros negros. Según los cálculos de la síntesis de partículas durante la gran explosión, no hay las suficientes como para formar tanta materia oscura. Estos cálculos han sido corroborados por mediciones del hidrógeno, helio y litio primordiales del universo.

Los neutrinos, especie ligera de partículas que pulula por el espacio desligada de cualquier tipo de átomo, no abarcan más que una pequeña fracción de la materia oscura. Por un tiempo, pareció muy posible que la materia oscura estuviese compuesta de neutrinos. Se sigue debatiendo su papel, según los experimentos son, probablemente, demasiado ligeros [*véase* "Detección de la masa de los neutrinos", por Edward Kearns, Takaaki Kajita y Yoji Totsuka; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 1999]. Además, son "calientes" —es decir, en el universo primitivo se movían a una velocidad comparable a la velocidad de la luz—. Las partículas calientes eran demasiado rápidas como para que se asentasen creando las estructuras cósmicas observadas.

COMPOSICION DEL UNIVERSO

MATERIAL	PARTICULAS REPRESENTATIVAS	MASA O ENERGIA DE LA PARTICULA TIPICA (ELECTRONVOLT)	NUMERO DE PARTICULAS EN EL UNIVERSO OBSERVADO	PROBABLE CONTRIBUCION A LA MASA DEL UNIVERSO	TIPO DE PRUEBA
Materia (“bariónica”) ordinaria	Protones, electrones	10^6 a 10^9	10^{78}	5 %	Observación directa, inferida a partir de la abundancia de los elementos
Radiación	Fotones del fondo cósmico de microondas	10^{-4}	10^{87}	0,005 %	Observaciones con telescopios de microondas
Materia oscura caliente	Neutrinos	≤ 1	10^{87}	0,3 %	Medidas de neutrinos, inferidas a partir de la estructura cósmica
Materia oscura fría	¿Partículas supersimétricas?	10^{11}	10^{77}	25 %	Inferencia a partir de la dinámica galáctica
Energía oscura	¿Partículas escalares?	10^{-33} (suponiendo que la energía oscura comprende partículas)	10^{118}	70 %	Observaciones de supernovas de las que se deduce la aceleración de la expansión cósmica

Casa mejor con las observaciones astronómicas la materia oscura “fría”, es decir, alguna partícula no descubierta aún que, en el momento de su formación, se moviese despacio. Aunque la materia oscura fría padece sus propios problemas a la hora de explicar las estructuras cósmicas [*véase* “El ciclo vital de las galaxias”, por Guinevere Kauffmann y Frank van den Bosch; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 2002], la mayoría de los cosmólogos los considera menores comparados con los que presentan las hipótesis alternativas. El actual modelo estándar de las partículas elementales no contiene tipos de partículas que puedan componer la materia oscura fría, pero sus extensiones —desarrolladas por razones muy distintas de las necesidades de la astronomía— ofrecen muchos candidatos plausibles.

Con gran diferencia, la extensión más estudiada es la supersimetría, de manera que me concentraré en ella. La supersimetría es una atractiva explicación de la materia oscura debido a que añade toda una nueva familia de partículas —una “supercompañera” para cada partícula elemental conocida—. Todas estas nuevas partículas pesan más (y por tanto son más lentas) que las ya conocidas. Algunas poseen las características necesarias para que se las considere posibles constituyentes de la materia oscura fría. La mayor atención recae en el neutralino, una amalgama de las supercompañeras del fotón (que transmite la fuerza electromagnética), el bosón Z (que transmite la fuerza nuclear débil) y quizás otros tipos de partículas. El nombre es un poco desafortunado: “neutralino” suena muy parecido a “neutrino”; pese a que las dos partículas comparten varias propiedades, son muy distintas.

Aunque el neutralino parece pesado conforme a los patrones normales, en general se la considera la partícula supersimétrica más ligera. En tal caso, debería ser estable: si una superpartícula es inestable, tendrá alguna partícula supersimétrica más ligera entre los productos de su desintegración. Tal como implica su nombre, el neutralino tiene carga cero; no la afectan, pues, las fuerzas electromagnéticas (entre ellas las relacionadas con la luz). Las masa, estabilidad y neutralidad supuestas del neutralino satisfacen todos los requerimientos de la materia oscura fría.

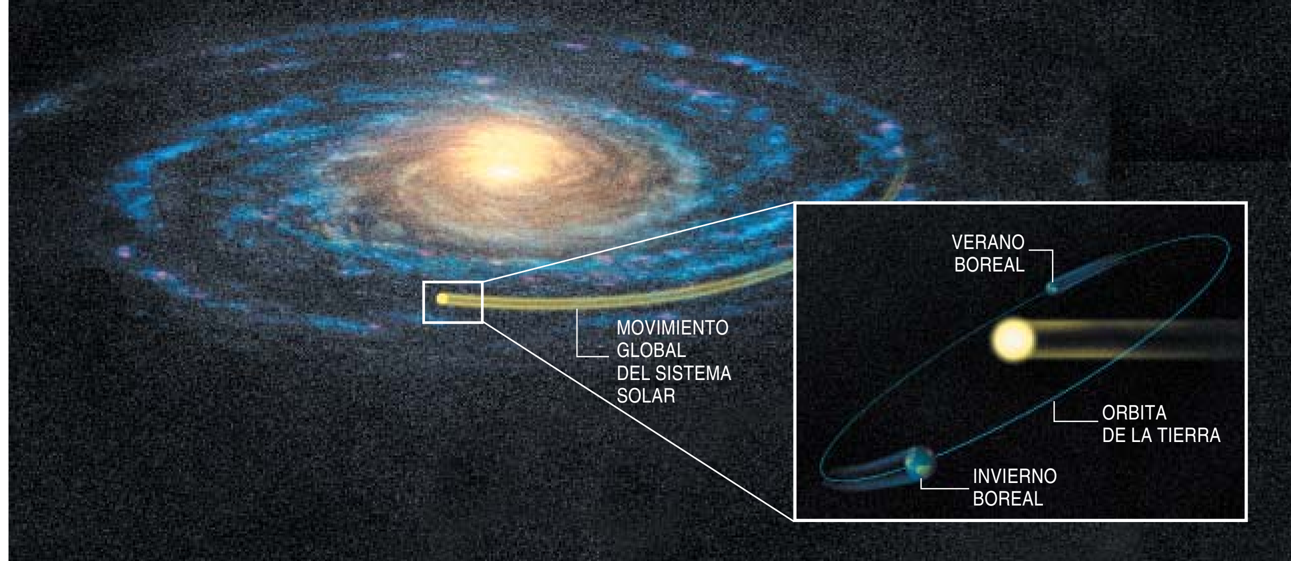
La teoría de la gran explosión da una predicción del número de neutralinos que se crearon en el caliente plasma primordial del cosmos. El plasma constituía una caótica sopa de todos los tipos de partículas. Ninguna partícula individual sobrevivía mucho. Enseguida colisionaba con otra partícula; ambas se aniquilaban, pero generaban nuevas partículas, que

El autor

DAVID B. CLINE ya ha publicado cuatro artículos en *Investigación y Ciencia*. Es profesor de física y astrofísica en la Universidad de California en Los Angeles. Estudió los neutrinos de alta energía, la desintegración de protones y los bosones W y Z. Después se ha centrado en la búsqueda de la materia oscura. Trabaja en el detector CMS del CERN, que un día podría hallar materia oscura.

EL VIENTO OSCURO

COMO LOS MOTOCICLISTAS SIENTEN el viento en la cara, en la Tierra estamos sometidos a un viento frontal de materia oscura. La materia oscura es un gas estacionario —sus partículas se mueven al azar, pero sin un movimiento organizado—; el sistema solar lo atraviesa a 220 kilómetros por segundo. La Tierra orbita en el sistema solar a 30 kilómetros por segundo. Cuando se tiene en cuenta la inclinación de la órbita, resulta que el viento de cara tiene una velocidad neta de 235 kilómetros por segundo en el verano boreal y de 205 kilómetros por segundo en el invierno. Esta variación distingue la materia oscura del ruido, que no cambia con las estaciones.



pronto colisionaban con otras, en un ciclo de destrucción y creación. Pero a medida que el universo se enfrió y se enrareció, las colisiones se hicieron menos violentas y el proceso se paró. Las partículas se condensaron una a una, empezando con las que tendían a chocar con menos frecuencia y continuando con los tipos más propensos a las colisiones.

Raras colisiones

El neutralino se resiste en especial manera a las colisiones. Por esa razón, se condensó pronto. En aquel momento la densidad del universo aún era muy elevada, así que se produjo un gran número de neutralinos. Si nos basamos en la masa esperada del neutralino y en su escasa tendencia a colisionar, la masa total de neutralinos coincide casi exactamente con la masa que, según se infiere, tiene la materia oscura en el universo. Esta concordancia señala con fuerza que los neutralinos son realmente materia oscura.

Para detectar la materia oscura hay que saber cómo interacciona con la materia normal. Los astrónomos suponen que interacciona sólo mediante la gravitación, la más débil de las fuerzas conocidas de la naturaleza. En tal caso, no esperan los físicos detectarla jamás. Pero la suposición de los astrónomos probablemente no es más que una aproximación conveniente que les permite describir las estructuras cósmicas sin tener que ocuparse de las propiedades detalladas de las partículas.

Las teorías de la supersimetría predicen que el neutralino interacciona mediante una fuerza más intensa que la gravitación: la fuerza nuclear débil, parecida a la interacción que delata a los neutrinos [*véase* "Búsqueda de bosones vectoriales intermedios", por David B. Cline, Carlo Rubbia y Simon van der Meer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 1982]. La inmensa mayoría de los neutralinos pasará a través de un trozo de materia sin interaccionar, pero de vez en cuando alguno chocará con un núcleo atómico, al que le transferirá una pequeña parte de su energía.

La improbabilidad y debilidad de la interacción se compensa con el número total de partículas. Al fin y al cabo, se cree que la materia oscura domina la galaxia. Por ser oscura, nunca ha perdido energía emitiendo radiación. Nunca, pues, se pudo aglomerar en grumos subgalácticos, en estrellas y planetas: continúa bañando el espacio interestelar en forma de gas. Nuestro sistema solar orbita alrededor del centro de la galaxia a 220 kilómetros por segundo; nos abrimos paso a través de ese gas, que nos rodea por todas partes (*véase el recuadro* "El viento oscuro"). Se estima que mil millones de partículas de materia oscura atraviesan por segundo cada metro cuadrado.

Leszek Roszkowski y su equipo de la Universidad de Lancaster, en Inglaterra, han realizado hace poco un cálculo completo de los ritmos de interacción de los neutralinos con la materia normal. Los ritmos suelen expresarse por medio del número de sucesos que ocurrirían en un día en un kilogramo de materia normal. Dependiendo de detalles teó-

DON DIXON

ricos, las cifras varían entre 0,0001 y 0,1 sucesos por kilogramo y día. Los experimentos actuales podrían detectar ritmos de sucesos en el extremo superior de esta banda.

La principal dificultad ya no es la sensibilidad del detector, sino su impureza. Todos los materiales de la Tierra, incluyendo el metal con el que se construyen los detectores, contienen cantidades muy pequeñas de material radiactivo, uranio o torio por ejemplo. La desintegración de estas sustancias produce partículas que se registran de manera muy parecida a como se registraría la materia oscura. La radiactividad terrestre supera la supuesta señal del neutralino en un factor del orden de 10^6. Si los detectores se colocan sobre la superficie, los rayos cósmicos empeoran la situación otro tanto. A fin de poder identificar cualquier partícula de materia oscura con seguridad, hay que reducir estos dos fondos indeseados en un factor de un millón.

Detectores

Así pues, hay que afrontar dos retos: detectar la interacción, de por sí débil, de la materia oscura con la materia ordinaria y apantallar el ruido que induce a confusión. Para empezar por el primero de esos problemas, cabe recurrir a varias propiedades de la materia que registran el retroceso de un núcleo que haya chocado con un neutralino. El más simple, quizá, de los métodos consiste en observar el calentamiento que tendría lugar cuando un núcleo que retrocediese penetrara en la materia que lo rodea y le cediera su energía cinética, elevándole por tanto un poco la temperatura. A fin de detectar este calentamiento, el material debe estar a una muy baja temperatura al empezar. Este es el principio de un detector criogénico.

Los detectores criogénicos, entre ellos los de la Busca Criogénica de Materia Oscura (CDMS) y el programa Edelweiss, dos de los más importantes proyectos relacionados con la materia oscura, están diseñados para medir fonones individuales, los cuantos de calor en un material. Funcionan a una temperatura de unos 25 milikelvin; registran el aumento de temperatura en las distintas partes del aparato con termistores. Los detectores individuales pesan unos centenares de gramos. Se instala un gran número de detectores para alcanzar una masa total de unos cuantos kilogramos o más; así aumenta la señal. Se espera que el último instrumento del CDMS, instalado en la Mina Soudan, en Minnesota, tome datos a finales de este año.

Un segundo método observa otro efecto ligado al núcleo en retroceso: la ionización. El núcleo choca con algunos electrones de los átomos que lo rodean; crea así iones excitados, o excímeros. Estos iones vuelven a capturar un electrón y retornan a su estado normal. En algunos materiales, sobre todo en gases nobles licuados como el xenón, el proceso emite luz (la "luz de centelleo"). De esa manera funcionan los láseres de excímeros —los que se usan en la cirugía ocular—. En el caso del xenón líquido, la luz es muy intensa y dura unos 10 nanosegundos. Un fotomultiplicador amplifica la señal hasta niveles detectables.

En los primeros años noventa, el proyecto ZEPLIN —dirigido por Hanguo Wang y yo mismo, en la Universidad de California en Los

ALGUNAS BUSQUEDAS DE LA MATERIA OSCURA

PROYECTO	LOCALIZACION	FECHA DE INICIO	TIPO DE DETECTOR PRIMARIO	MATERIAL DEL DETECTOR PRIMARIO	MASA (Kg) DEL DETECTOR PRIMARIO	TIPOS DE DETECTORES DISCRIMINADORES
UKDMC	Boulby, R.U.	1997	Centelleo	Yoduro de sodio	5	Ninguna
DAMA	Gran Sasso, Italia	1998	Centelleo	Yoduro de sodio	100	Ninguna
ROSEBUD	Canfranc, España	1999	Criogénico	Oxido de aluminio	0,05	Térmico
PICASSO	Sudbury, Canadá	2000	Gotitas líquidas	Freón	0,001	Ninguno
SIMPLE	Rustrel, Francia	2001	Gotitas líquidas	Freón	0,001	Ninguno
DRIFT	Boulby, R.U.	2001	Ionización	Disulfuro de carbono gaseoso	0,16	Direccional
Edelweiss	Fréjus, Francia	2001	Criogénico	Germanio	1,3	Ionización, térmico
ZEPLIN I	Boulby, R.U.	2001	Centelleo	Xenón líquido	4	Temporal
CDMS II	Soudan, Minn., EE.UU.	2003	Criogénico	Silicio, germanio	7	Ionización, térmico
ZEPLIN II	Boulby, R.U.	2003	Centelleo	Xenón líquido	30	Ionización, centelleo
CRESST II	Gran Sasso, Italia	2004	Criogénico	Oxido de calcio y wolframio	10	Centelleo, térmico

Angeles, y por Pio Picchi, de la Universidad de Turín— creó unos detectores de xenón líquido en dos fases. Amplifican la luz añadiendo una capa de gas inmersa en un campo eléctrico. El campo acelera los electrones expulsados por los núcleos de retroceso; de unas pocas partículas hace un alud. Debiera ser posible construir un detector de xenón líquido de 10 toneladas; sería sensible a los neutralinos, aun cuando su interactividad fuese muy baja.

El xenón no tiene por qué estar en forma líquida. Algunos detectores lo usan en forma gaseosa. Aunque el gas tiene una menor densidad que el líquido, revela con más facilidad el trazo dejado por el núcleo de retroceso. El trazo apunta en la dirección de la materia oscura entrante; es una comprobación adicional de si lo ha generado o no un neutralino galáctico. Los laboratorios subterráneos Boulby, en Inglaterra, están preparando detectores de este tipo.

El xenón resulta idóneo porque carece de isótopos radiactivos naturales de vida larga (se reduce así el ruido de fondo) y se dispone de él fácilmente en la atmósfera (una vez purificado, para separarlo del criptón radiactivo dejado por las pruebas de las bombas nucleares). Pero no es el único material que centellea. DAMA, un experimento del Laboratorio del Gran Sasso, cerca de Roma, lleva yoduro de sodio. Pesa 100 kilogramos; de este tipo de detectores del que estamos hablando, es el mayor del mundo.

Distinguir

Tres pasos suelen darse para afrontar el otro gran reto, superar el ruido de fondo de la radiactividad natural y los rayos cósmicos. En primer lugar, se apantallan los rayos cósmicos colocando los detectores a gran profundidad y encerrándolos en recipientes especiales. En segun-

DOS TIPOS DE DETECTORES DE MATERIA OSCURA

DETECTOR DE CENTELLEO



Proyecto ZEPLIN II (*también abajo*)

Principio:
Busca leves impulsos de luz provocados por la materia oscura al pasar, en este caso concreto, por xenón líquido

Ventajas:
- Mide la forma del impulso; así distingue la materia oscura de la materia ordinaria
- Mide múltiples propiedades de las partículas

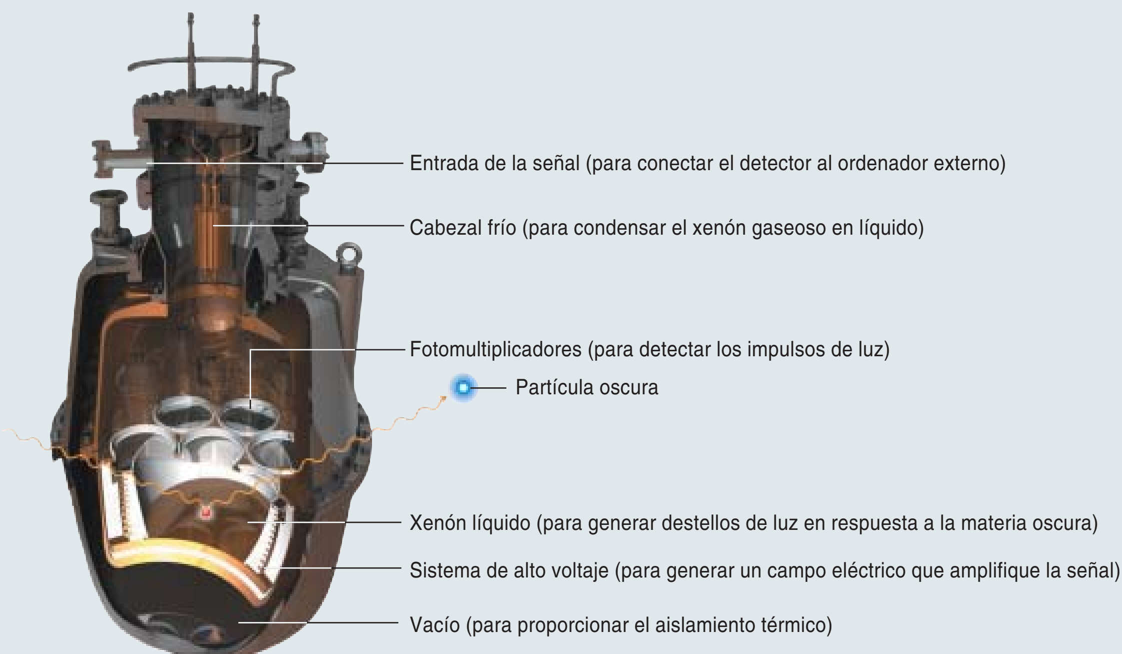
DETECTOR CRIOGENICO



Proyecto CDMS II

Principio:
Busca leves impulsos de calor generados por la materia oscura al pasar por un cristal superenfriado

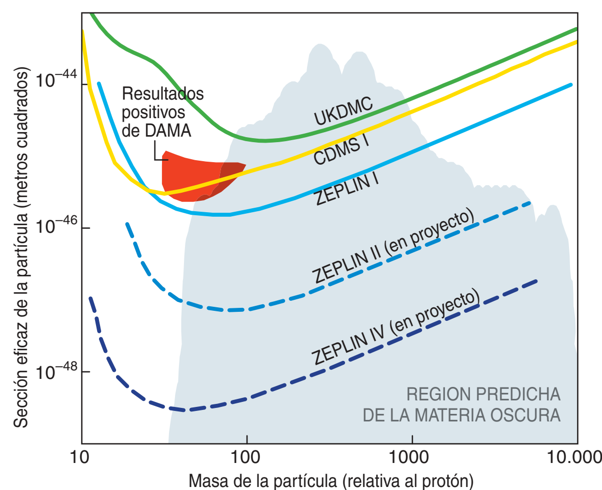
Ventajas:
- Sencillez
- Elevada sensibilidad a partículas de baja energía
- Medición precisa de la energía de la partícula



CORTESIA DE DAVID B. CLINE; ROY PREECE *Grupo de Materia Oscura, Laboratorio Rutherford Appleton (sección)*

do lugar, se purifica el material del detector a fin de reducir la contaminación radiactiva. En tercer lugar, se construyen instrumentos especiales que revelan las señales distintivas de la materia oscura respecto de otras partículas.

No basta con este par de pasos. En consecuencia, la nueva generación de detectores de materia oscura da un tercero: ejecutar una u otra manera de discriminar los sucesos. La primera línea de defensa busca una variación anual de la señal. El flujo de materia oscura ha de ser mayor en el verano boreal, cuando el movimiento orbital de la Tierra se añade al movimiento global del sistema solar a través de la galaxia, que en el invierno boreal, cuando se resta (*véase el recuadro* "El viento oscuro"). La variación de la señal puede llegar a ser de unas partes en cien.



2. LAS PROPIEDADES DE LA MATERIA OSCURA caen, predice la teoría, en algún punto de cierta zona de esta gráfica (*área gris*). Las dos propiedades que se muestran en ella son la masa y la sección eficaz efectiva, una medida de la probabilidad de que las partículas de materia oscura interaccionen con la materia ordinaria. Los detectores (*curvas de colores*) ya analizan una parte sustancial de la región predicha; las curvas de colores indican el límite de su sensibilidad. No han encontrado nada, salvo uno, DAMA, que ha registrado indicios de materia oscura en una estrecha banda de las propiedades posibles (*área roja*). Los futuros detectores deberán poder analizar el intervalo predicho entero; probarán así la existencia de la materia oscura o la descartarán.

JOHNNY JOHNSON; FUENTE: RICK GAITSKELL Y VUK MANDIC *Universidad de California, Berkeley (dendera.berkeley.edu/plotter/entryform.html)*

Los proyectos más avanzados añaden un detector secundario, construido con una técnica diferente de la aplicada en el primario. Uno y otro responderán de manera algo distinta a los diferentes tipos de partículas. Por ejemplo, las partículas del fondo tienden a producir más ionización que un núcleo que retrocede tras la colisión con un neutralino. La combinación de dos detectores capta esta diferencia.

Aplicando uno o más de los procedimientos citados, las búsquedas de las señales de la materia oscura empezaron a finales de la década de 1980. Todas menos una han sido negativas hasta la fecha; no sorprende, habida cuenta de que sólo recientemente han alcanzado la sensibilidad y la tolerancia al ruido requeridas. La única excepción es DAMA. Hace cuatro años este proyecto hizo saber que había observado una variación anual. Suscitó en partes iguales emoción y escepticismo. El problema estribaba en que DAMA no utiliza detectores múltiples para discriminar entre señal y ruido. Otros tres experimentos que sí usan detectores múltiples han generado desde entonces dudas acerca de las afirmaciones de DAMA. Edelweiss, ZEPLIN I y CDMS I no han observado nada en buena parte del intervalo de parámetros que DAMA había analizado. El equipo de CDMS I asegura que el nivel de confianza de un resultado nulo es del 98 por ciento. Si otros proyectos continúan sin dar fruto, DAMA deberá atribuir su señal a procesos radiactivos o a otros ruidos.

La nueva generación de detectores habrá de ser capaz de confirmar o excluir los neutralinos de manera concluyente. Si no encuentran nada, no será la supersimetría la solución que la naturaleza ha elegido para el problema de la materia oscura. Los teóricos deberán acudir a otras ideas, con independencia de lo desagradables que ahora puedan parecer. Pero si los detectores registran y verifican una señal, será uno de los grandes descubrimientos del siglo XXI. Se habría descubierto el 25 por ciento del universo (quedaría sin explicación sólo la energía oscura). Se trataría de la parte más espectacular del hallazgo, pero con ella vendría otra valiosa información. Si los detectores pueden captar partículas de materia oscura, los aceleradores de partículas (pensemos en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN) podrán recrearlas y realizar experimentos controlados. La confirmación de la supersimetría presagiaría el descubrimiento de un gran número de nuevas partículas y reforzaría la teoría de cuerdas, de la que no cabe desgajar la supersimetría. Quizá se resuelva pronto el mayor misterio de la astrofísica moderna.

Bibliografía complementaria

THROUGH A UNIVERSE DARKLY: A COSMIC TALE OF ANCIENT ETHERS, DARK MATTER, AND THE FATE OF THE UNIVERSE. Marcia Bartusiak. HarperCollins, 1993.

SUPERSYMMETRIC DARK MATTER. Gerard Jungman, Marc Kamionkowski y Kim Griest en *Physics Reports*, vol. 267, páginas 195-373; marzo 1996.

JUST SIX NUMBERS: THE DEEP FORCES THAT SHAPE THE UNIVERSE. Martin Rees. Basic Books, 1999.

QUINTESSENCE: THE MYSTERY OF THE MISSING MASS. Lawrence M. Krauss. Basic Books, 2001.

SOURCES AND DETECTION OF DARK MATTER AND DARK ENERGY IN THE UNIVERSE. Dirigido por David B. Cline. Springer Verlag, 2001.

WIMP DIRECT DETECTION OVERVIEW. Yorck Ramachers. Revisión invitada en la conferencia NEUTRINO 2002, Munich, Alemania, 25-30 de mayo de 2002. arXiv.org/abs/astro-ph/0211500

Los genes determinantes de las antenas

En la mosca del vinagre, el gen *homothorax* selecciona la identidad de la antena. Los genes selectores organizan el patrón corporal en todos los animales. En el ratón, el gen homólogo de *homothorax* es el protooncogén Meis-1

Fernando Casares

Los animales multicelulares, desde corales hasta ballenas, pasando por los seres humanos, están formados por distintos tipos de células. Se agrupan éstas en tejidos y órganos, para originar así la multitud de estructuras que componen el animal. En la mayoría de los casos, esta compleja organización funcional comienza en una célula, el huevo fecundado o zigoto, y continúa durante el desarrollo embrionario hasta el animal adulto. ¿Cómo se produce este fenómeno? ¿De dónde procede la información que dirige el desarrollo? ¿Cómo se coordina la aparición correcta de los órganos en los lugares del cuerpo que les son propios?

Las instrucciones para la formación y funcionamiento de un animal se hallan escritas en sus genes, el conjunto de los cuales se denomina genoma. Cada especie posee su genoma particular. Los genes son secuencias químicas de ácido desoxirribonucleico (ADN), se encuentran empaquetados en cromosomas y se alojan en el núcleo de la célula. Para comprender el desarrollo embrionario, habrá, pues, que entender cómo funcionan los genes a lo largo del proceso que lleva desde el huevo fecundado hasta el animal adulto.

La mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster*, constituye uno de los bancos de pruebas más potentes de que disponen los biólogos para buscar respuestas a sus preguntas. *Drosophila*, que se reproduce con facilidad, presenta un ciclo biológico de tan sólo nueve días desde la fecundación del huevo hasta el adulto. Y lo que reviste especial interés, su estudio intensivo desde principios del siglo XX ha permitido conocer cómo funcionan sus genes y cómo manipularlos con relativa facilidad.

Se ha determinado ya la secuencia de sus cuatro pares de cromosomas. Es decir, conocemos la transcripción completa de las instrucciones genéticas que establecen su estructura, su metabolismo, su comportamiento, etcétera. Pero nos hallamos muy lejos de comprender cómo entran en funcionamiento todas esas instrucciones escritas en el genoma.

Desde finales del siglo XIX los biólogos han venido comprobando que los procesos básicos que gobiernan el desarrollo en diferentes grupos de animales son, en líneas generales, los mismos, no obstante la disparidad de diseños y modos de vida. Entre otras muchas cosas, los organismos comparten una misma molécula para el almacenamiento de la información genética, el ADN;

El autor

FERNANDO CASARES ha trabajado en el Departamento de Bioquímica y Biofísica de la Universidad de Columbia, en Nueva York. Actualmente dirige el grupo de Biología del Desarrollo en el Instituto de Biología Molecular y Celular (IBMC) de la Universidad de Oporto.

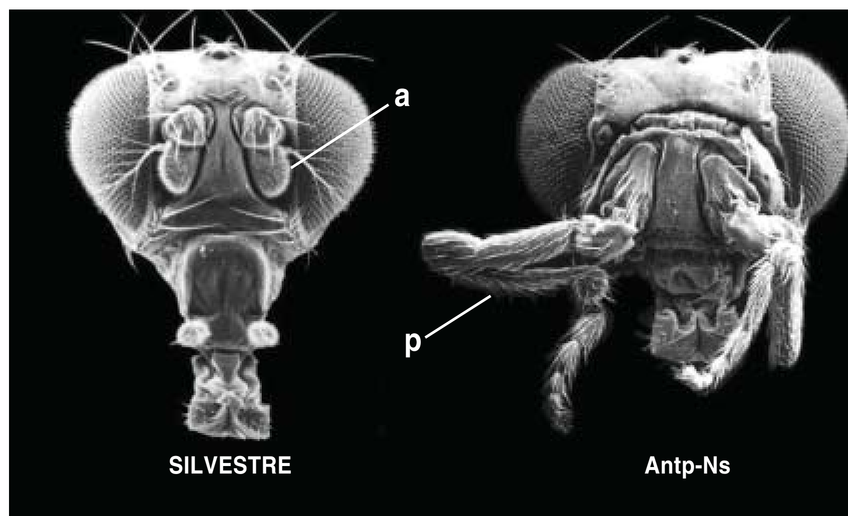
las células que constituyen sus tejidos y órganos presentan una estructura muy semejante y obtienen energía de los alimentos por idénticas rutas bioquímicas.

Con tales premisas la ciencia analiza la biología de organismos sencillos, como *Drosophila*, confiando en que sus resultados sean extrapolables a organismos más complejos, incluidos nosotros mismos. No deja de resultar sorprendente comprobar el enorme grado de conservación de ciertos procesos entre organismos muy dispares.

Ciclo biológico

El ciclo biológico de la mosca *Drosophila*, su desarrollo, comienza con una célula, el zigoto, resultado de la fusión de un óvulo (o huevo) y un espermatozoide. El zigoto contiene toda la información genética necesaria para el desarrollo del individuo. Pero no se utiliza toda a la vez; se va aplicando de un modo regulado, escalonado. Primero el zigoto produce más células mediante la activación de un conjunto particular de genes. Ahora el embrión es una bola hueca de células, o blastodermo, sin ninguna diferenciación morfológica. Poco después, entra en acción el grupo de genes que delimita las hojas embrionarias, que darán lugar a la epidermis (o futura "piel" del animal), el sistema nervioso, el tubo digestivo, los músculos y la grasa.

Los genes de segmentación subdividen el blastodermo en una serie de zonas (segmentos), que constituyen la unidad de construcción de la mosca. Cada segmento dará lugar, en una fase ulterior del desarrollo, a estructuras distintas. Por ejemplo, los tres segmentos del tórax tendrán un par de patas cada uno, mientras que los segmentos abdominales no las tendrán. Dentro de los segmentos torácicos, el segundo es mucho mayor que los otros dos, y desarrolla el par de alas de la mosca. A su vez, los segmentos que componen la cabeza difieren de los del resto del animal; en vez de patas, portan antenas, apéndices con funciones olfativas; en vez de alas, tienen ojos compuestos, órganos especializados para la visión.



1. LAS MUTACIONES EN LOS GENES *HOX* causan la transformación de unas partes del cuerpo en otras. En este caso, la figura muestra una micrografía de la mosca *Drosophila* silvestre a la izquierda. En *a* se señala una de las antenas, que son los órganos del olfato. Cuando el producto del gen *Antennapedia*, habitual en las patas, se produce de una forma anormal en las antenas, como es el caso del mutante Antp-Ns (*micrografía de la derecha*), éstas se "transforman" en patas (*"p" en la figura*). Por su capacidad de seleccionar qué órganos se generan en distintas partes del organismo, los genes *HOX* desempeñan una función clave durante el desarrollo embrionario.

FOTOGRAFIAS TOMADAS DE FLYBASE

¿Qué genes son los responsables de esas diferencias?

La respuesta nos viene del ámbito de la investigación de la genética del desarrollo, disciplina en la que fue pionero Ed Lewis, premio Nobel de medicina. Se han identificado un grupo de genes como los responsables de las diferencias corporales: los genes *HOX*. Cuando la función de alguno de ellos se altera (por mutación espontánea o por manipulación genética), las estructuras de un segmento se transforman en las de otro segmento. A este fenómeno se le denomina homeosis, por cuya razón a los genes *HOX* se los conoce también como "genes homeóticos".

La mutación *Antennapedia nasobemia* (o *Antp-Ns*) causa la transformación espectacular de las antenas de la cabeza en patas. Dicha mutación se produce en el gen homeótico *Antennapedia* (o "antena como pata", abreviadamente Antp). *Antp* es sólo uno de los genes *HOX*. En *Drosophila* existen ocho. Cuando se definieron tales genes, se pudo identificar su secuencia de ADN y descubrir varias características muy interesantes en los mismos.

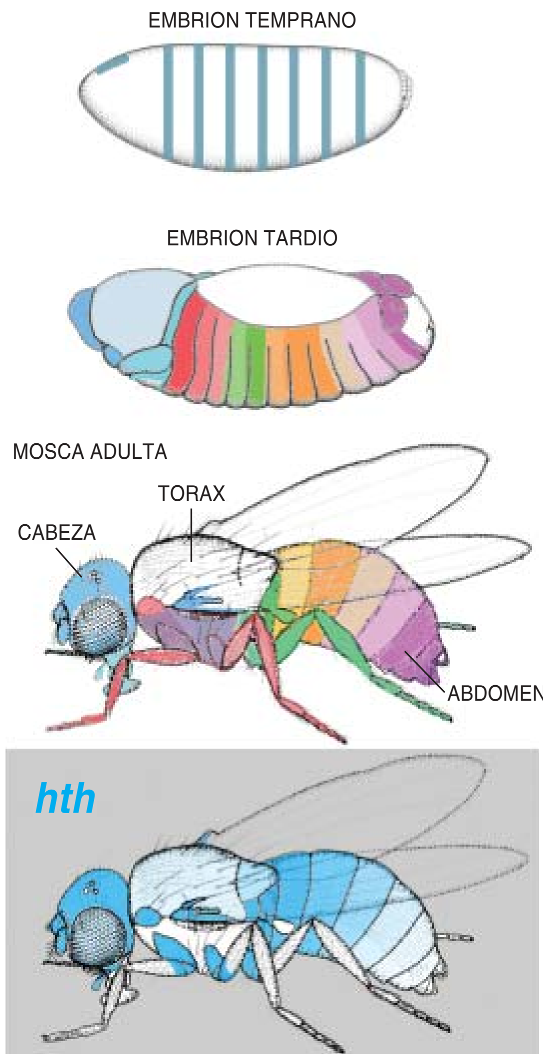
Se trata, en primer lugar, de genes que codifican proteínas que contienen un homeodominio. Con el mismo se unen al ADN y regulan la actividad de otros genes.

En segundo lugar, cada segmento del cuerpo expresa un gen *HOX* o una combinación única de estos genes, de suerte que desarrolla un conjunto también singular de estructuras. En razón de esa propiedad, los genes *HOX* reciben el apelativo de genes selectores; su expresión —producción de proteína— selecciona la identidad de un grupo de células. Cada una de las proteínas HOX regula un conjunto distinto de genes encargados de convertir en realidad lo que ellos seleccionan. Por ejemplo, una pata para caminar o una antena para oler.

En tercer lugar, los genes *HOX* también se encuentran presentes en todos los animales estudiados, donde determinan el desarrollo de cada estructura del cuerpo en el lugar apropiado del mismo. Esta observación sugirió que los mecanismos subyacentes bajo el desarrollo de todos los animales comparten muchos más elementos de lo que pudiera parecer a primera vista. Se ha demostrado incluso que, hasta cierto punto, un gen *HOX* humano puede sustituir a su equivalente de

la mosca durante el desarrollo del insecto.

Sin embargo, el proceso de selección del desarrollo de un órgano es complejo. Comporta muchas interacciones entre genes. Sólo en la mosca, hay ocho genes *HOX*, responsables de la mayoría de las partes del animal. Los biólogos prefieren analizar primero problemas simples, confiando en que sus resultados ayuden a avanzar en problemas más complejos. Si en la formación de los órganos intervienen los genes *HOX*, presentes en todos los animales, es posible que estos resultados, obtenidos en un organismo modelo como la mosca, cuenten con validez general en otros organismos (incluido el *Homo sapiens*). En lo que sigue, abordaré los experimentos diseñados para desentrañar uno de esos problemas: cómo se determina, durante el desarrollo, que las antenas sean los apéndices de la cabeza y las patas, los del tórax.



2. EL GEN *HOMOTHORAX* colabora con los genes *HOX* en la asignación de la identidad de distintas partes del cuerpo de la mosca. El embrión temprano se subdivide muy pronto en una serie de segmentos; responsables de ello son un conjunto de genes que reciben la denominación común de "genes de segmentación". Los bordes de estos segmentos se han representado en bandas azules. En el embrión tardío, cada segmento expresará un gen o combinación de genes *HOX* única (lo que se indica en la figura en distintos colores). La actividad de estos genes hará que cada segmento del cuerpo desarrolle un conjunto distintivo de estructuras en el animal adulto, es decir, una identidad particular. El producto del gen *homothorax* (abreviado "*hth*", en azul) se produce sólo en ciertas regiones del animal, donde colabora con los productos HOX para la asignación de identidades. Sin embargo, algunas partes del cuerpo se desarrollan sin expresar ningún gen *HOX*, como es el caso de las antenas en la cabeza de *Drosophila*. Trabajos recientes muestran que el gen *homothorax* desempeña un papel decisivo en la formación de las mismas.

FERNANDO CASARES

Patas y antenas

Partiremos de los ensayos realizados por Gary Struhl, a comienzo de los años ochenta, cuando trabajaba en Cambridge. Struhl se centró en el control genético de la formación de las patas. A pesar de su similitud, los pares de patas de cada uno de los tres segmentos del tórax de una mosca son ligeramente distintos entre sí. Cuando Struhl eliminó la función del gen *HOX Sex Combs Reduced* (*Scr*), las patas del primer segmento se transformaron en patas del segundo. Si eliminaba la función del *HOX Ultrabithorax* (*Ubx*), eran ahora las patas del tercer segmento las que se transformaban en patas del segundo segmento. Por consiguiente, si las moscas carecían de ambos genes, tenían tres pares de patas del tipo "segundo segmento torácico". Pero la mayor sorpresa vino luego: si eliminaba, además de *Scr* y *Ubx*, también *Antp*, las patas se transformaban en antenas. Con estos resultados, Struhl concluyó que el gen *Antp* era necesario para la formación de las patas. Supuso que *Antp* realizaría esta función bloqueando los genes determinantes de la antena. Pero en esa época se desconocía la naturaleza de este gen (o genes). En ausencia de *Antp*, los "genes de antena" harían que las patas fueran antenas.

Recordemos que la mutación Antp-Ns causa la transformación opuesta, de las antenas en patas. El gen *Antp* se expresa normalmente en los apéndices del tórax, las patas. El grupo de Walter Gehring, de la Universidad de Basilea, demostró que en los mutantes Antp-Ns el producto de *Antp* se expresaba anómalamente en las células que iban a dar lugar a la antena. Es más, si en una mosca normal (silvestre) se expresaba *Antp* en la antena mediante procedimientos de manipulación genética, ésta también se transformaba en pata. Los experimentos demostraban que un cambio en la expresión de tan sólo un gen *HOX* —en este caso *Antp*— podía redirigir el desarrollo de un órgano: el de una antena hacia el de una pata. Basado en ese resultado, Gehring propuso que *Antp* podía ser el gen selector de "pata".

A esas alturas de la investigación, el estado de la cuestión podía compendiarse en el cuadro siguiente: *Antp* era el gen selector de pata, capaz de bloquear un hipotético gen de antena. Como *Antp* sólo se expresa en el tórax, las patas aparecen en dicha región, en tanto que las antenas sólo se forman en la cabeza. En ausencia de *Antp*, las patas se desarrollan, "por defecto", como antenas.

Pero el panorama empezó a complicarse cuando Sergio González Crespo y Ginés Morata, del Centro de Biología Molecular de Madrid, y Cordelia Rauskolb y Eric Wies-

chaus, de la Universidad de Princeton, encontraron que, al eliminar la función de otro gen, llamado *extradenticle* (*Exd*), las antenas se transformaban en patas, lo mismo que sucedía en la mutación Antp-Ns.

Gen *Exd*

Exd constituye un gen muy especial. En su ausencia, los genes *HOX* funcionan de manera inespecífica, es decir, son incapaces de seleccionar las vías de desarrollo adecuadas en cada uno de los segmentos donde se expresan. *Exd* codifica, a su vez, una proteína con homeodominio y, por tanto, capaz de unirse al ADN. Dicho polipéptido se ha observado en todos los animales estudiados. Ello significa que al gen *Exd* le debe corresponder alguna función muy general, que afecte a la función de los genes *HOX*. Las proteínas HOX se localizan en el núcleo de la célula, donde se encuentra la información genética escrita en el ADN. Cuando *Exd* se halla en el núcleo de la célula, se une a la proteína HOX; el complejo activa o reprime, según los casos, la expresión de ciertos genes.

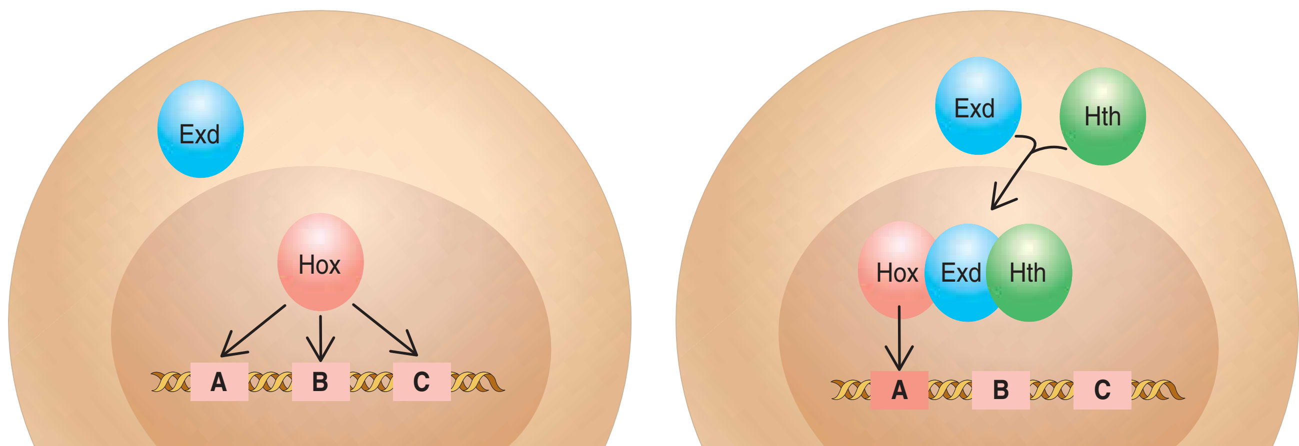
Pero el gen *Exd* aparece también en el citoplasma celular, donde no ejerce función alguna. ¿Mediante qué mecanismos se regula la entrada de *Exd* en el núcleo? Gabrielle Rieckhof y Richard Mann, de la Universidad de Columbia en Nueva York, descubrieron que el producto del gen *homothorax* (*Hth*) transporta a *Exd* dentro del núcleo. Cuando Rieckhof determinó la secuencia de *Hth*, observó que era muy semejante a un gen de ratón, *Meis*, que en ciertas circunstancias produce leucemias, un gen que también poseemos los seres humanos. De nuevo, *Hth* era un gen con homeodominio y se conservaba en otros animales.

Dada la asociación entre *Exd* y *Hth*, no nos sorprendió encontrar que, cuando eliminamos la función de *Hth* de las antenas, éstas se transformaban en patas. Menos esperado fue lo siguiente: en las antenas transformadas en patas por falta de *Hth* no se expresaba *Antp* (ni ningún otro gen *HOX*). Con ello quedaba descartado que el gen *Antp* fuera selector de pata; las patas se formaban en la cabeza sin *Antp*. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre *Exd* y *Hth*? *Hth* se expresa sólo en ciertas células del animal, mientras que *Exd* está presente en todas. Por tanto, sólo donde se expresa *Hth*, ambos, *Hth* y *Exd*, entran en el núcleo.

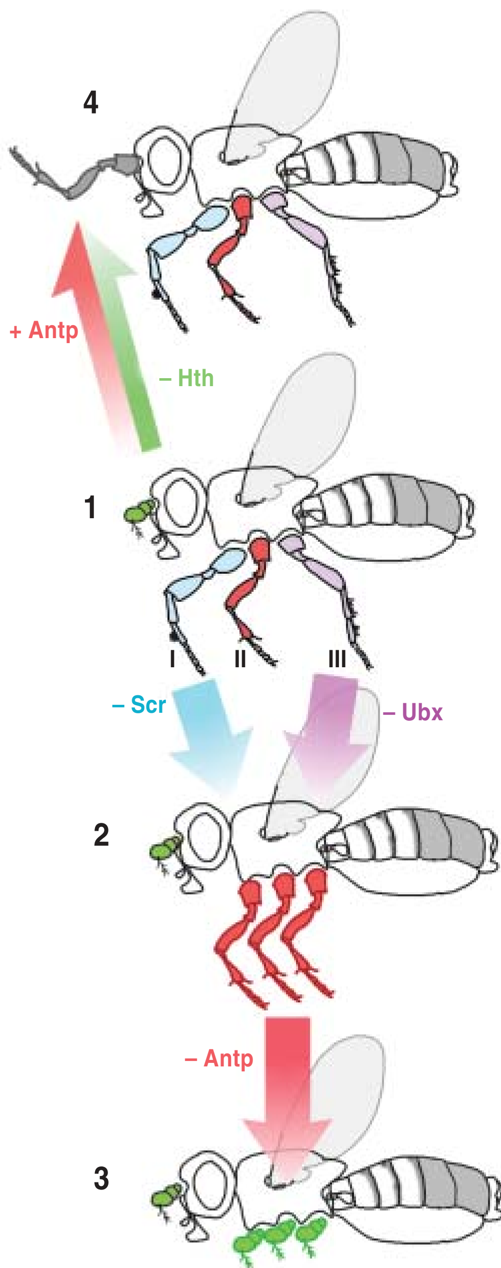
Gen *Hth*

Por su parte, *Hth* poseía la primera de las características necesarias para ser el gen determinante de las antenas, a saber, se le requería, junto con *Exd*, para la formación de ese órgano del olfato. Para erigirse en genuino gen selector de antena, *Hth* tendría, además, que producirse en las células precursoras de la antena, pero no en las de las patas. Según propuso Struhl, *Hth* debería también ser reprimido por *Antp* en las patas. Y, por último, *Hth* debería iniciar el desarrollo de antenas en lugares del cuerpo donde no se expresase *Antp*.

Analizamos las cuatro condiciones. Para observar la expresión de *Hth* en los tejidos de la larva de la mosca utilizamos dos procedimientos. Con el primero detectamos los ARN mensajeros de *Hth*. (Para la producción de cualquier proteína, en este caso Hth, la secuencia de ADN del gen que la codifica se copia, o transcribe, en una molécula de ARN en el núcleo, el ARN mensajero. Este ARN sale del núcleo al citoplasma, donde es leído por la maquinaria de síntesis de proteínas y se produce la molécula de proteína.) El segundo procedimiento nos permitía localizar directamente la proteína. Mediante el uso de an-



3. EL PRODUCTO DEL GEN *HOMOTHORAX* actúa, en su nivel molecular, como cofactor de las proteínas HOX, confiriéndoles especificidad. En ausencia de *homothorax* (*Hth*), la proteína extradenticle (Exd) no accede al núcleo de la célula (*área gris*), donde se lleva a cabo la regulación de la expresión de los otros genes necesarios para la diferenciación celular (*izquierda*). Al faltar en el núcleo los "cofactores" *Exd* y *Hth*, los productos HOX se muestran incapaces de activar, de manera específica, los genes adecuados para la diferenciación celular (representados por A, B y C). Mas, en presencia de *Hth*, se produce la entrada de *Exd* en núcleo, donde forman un complejo ternario con la proteína HOX. Este complejo induce de manera específica los genes que han de intervenir en la diferenciación celular, de acuerdo con las instrucciones de cada proteína HOX (en el ejemplo, sólo A se activaría, mientras que los genes B y C seguirían silenciosos). Sin embargo, durante la especificación de las antenas, *Exd* y *Hth* no necesitan de ninguna proteína HOX para operar.



4. CONTROL GENETICO DE LA FORMACION DE PATAS Y ANTENAS. Las moscas silvestres (*1*) presentan dos tipos fundamentales de apéndices ventrales: las antenas (*en verde*) y las patas (pares I, II y III, correspondientes a los 3 segmentos del tórax). Los tres pares de patas difieren ligeramente entre sí. Al eliminar la función de los genes *HOX*, *Scr* y *Ubx* de las patas I y III, respectivamente, éstas se transforman en patas de tipo II (*2*). Si, además, eliminamos la función del HOX *Antennapedia* (*Antp*) de las patas, éstas se transforman en antenas (*3*). Tal vía genética (paso de 2 a 3) nos indica que *Antp* se requiere para bloquear la formación de antenas en el tórax; resulta, por ende, imprescindible para el desarrollo de las patas. Los genes *Scr* y *Ubx* se requieren para desarrollar la morfología distintiva de las patas I y III (paso de 1 a 2). De la misma manera que *Antp* en las patas bloquea la formación de las antenas, la función anormal de *Antp* en la antena transforma ésta en pata (paso 1 a 4). En ausencia de *homothorax* (*Hth*), la antena se convierte también en pata (paso de 1 a 4). Es más, la pata resultante se forma sin la contribución de *Antp*, ni de ningún otro *HOX*. El camino genético se puede describir como sigue: en ausencia de *Hth* y genes *HOX*, el apéndice que se forma "por defecto" es una pata. En la cabeza, la expresión de *Hth* determina que aquélla se desarrolle en antena. En el tórax, *Antp* bloquea la expresión de *Hth* y permite el desarrollo de la pata nuevamente. Además, los genes *HOX Scr*, *Antp* y Ubx contribuyen a la morfología final de las patas y determinan que sean distintas unas de otras.

FERNANDO CASARES

ticuerpos monoclonales, se detecta Hth específicamente entre todas las proteínas de la célula.

Con ambas técnicas encontramos que la mayoría de las células que daban lugar a la antena producían Hth, pero muy pocas la fabricaban en la pata. Comprobamos también que *Antp* reprime a *Hth* en las patas. Así, si eliminamos la función de *Antp* de células de la pata, éstas comienzan a expresar *Hth* (y se convierten en antenas, como demostró Struhl). Por otro lado, en la mutación *Antp-Ns*, *Antp* se expresa en la antena y reprime la producción de Hth, causando la transformación de las antenas en patas.

Por último, forzamos la expresión de *Hth* en otras regiones del cuerpo de la mosca para comprobar si *Hth* poseía la capacidad de desarrollar antenas también en ellas. Se trataba de un experimento discriminante. Si obteníamos una respuesta afirmativa, podía admitirse que *Hth* constituía el gen determinante de antena.

Se trataba, a la vez, de un ensayo delicado. Las técnicas de manipulación genética aplicadas a *Drosophila* nos permiten cierto grado de control sobre cuándo y dónde, en el curso del desarrollo, podemos expresar experimentalmente un gen e incluso la cantidad del mismo. Pero los sistemas biológicos se desarrollan mediante un control muy preciso de los genes, difícil de alcanzar en los trabajos experimentales. Por otro lado, no todas las células del cuerpo son equivalentes. Cada una ha tenido su propia historia biológica; por su posición dentro del organismo y por su genealogía celular ha recibido distintas señales y ha expresado diferentes conjuntos de genes que determinan su susceptibilidad a responder a nuevas instrucciones genéticas.

Así las cosas, no esperábamos que *Hth* fuera capaz de desarrollar antenas en cualquier parte del animal, cuando forzásemos su expresión. Sin embargo, bajo determinadas condiciones de expresión, nuestro experimento se coronó con éxito: el gen *Hth* inducía la formación de antenas en otros lugares del cuerpo, como el final del abdomen. Aún más sorprendente fue que el gen *Meis-1*, homólogo de *Hth* en el ratón, provocaba, en las mismas condiciones experimentales, la formación de antenas; se manifestaba así que ambos genes conservaban su función a lo largo de la evolución.

Gen *Distal-less*

En la mosca no sólo los genes *Hth* y *Exd* dan la instrucción de formación de antenas. Los resultados obtenidos por Grace Panganiban y su grupo, de la Universidad de Wisconsin en Madison, muestran que el gen *Hth* necesita de la colaboración de *Distal-less*, otro gen con homeodominio, para la especificación de la antena. La parte del cuerpo donde, en nuestros experimentos, *Hth* y *Meis-1* desarrollaban antenas, expresa normalmente *Distal-less*; observación que concuerda con los experimentos de Panganiban. Por tanto, al menos un trío de genes, *Hth*, *Exd* y *Distal-less*, dan la instrucción genética para la formación de la antena. Además, para la determinación de las antenas este conjunto de genes funciona sin necesidad de proteínas HOX.

Todos estos resultados podrían ser sólo una particularidad de un pequeño insecto. Sin embargo, parece muy posible que en otros organismos, como en el pollo o en nosotros mismos, los genes homólogos de *Hth*, *Exd* y *Distal-less* se relacionen de una manera muy semejante a como lo hacen en la mosca, según demuestran los trabajos de Miguel Torres y colaboradores, del Centro Nacional de Biotecnología de Madrid. Entre las paradojas surgidas a raíz de tales estudios no es la menor descubrir que genes muy parecidos instan el desarrollo de órganos muy distintos en diferentes animales, como las patas de las moscas y las extremidades de los mamíferos.

Los resultados que hemos descrito descubren los genes que dan las instrucciones para la formación de un órgano. Sin embargo, nos hallamos todavía lejos de conocer los mecanismos en cuya virtud dichos genes controlan la formación del órgano en cuestión. Lo cierto es que, cuando estos genes no funcionan correctamente, las células se comportan de un modo anómalo. Así, cuando el gen *Hth* de la mosca no funciona en la antena, aparece una pata. Cuando el gen homólogo del ratón, *Meis*, se expresa anormalmente en ciertas células sanguíneas, éstas no dejan de proliferar y generan un cáncer.

Dada la potencia de *Drosophila* como organismo experimental, y la conservación de los mecanismos genéticos entre los animales, el estudio de la mosca ayudará a comprender problemas biológicos y biomédicos que son más difíciles de analizar en otros organismos.

Bibliografía complementaria

EL COMPLEJO BITHORAX DE *DROSOPHILA MELANOGASTER*. F. Casares y E. Sánchez-Herrero, en *Investigación y Ciencia*, marzo de 1995.

PULLING THE FLY'S LEG. E. Sánchez-Herrero y Ginés Morata, en *Nature*, vol. 392, págs. 657-658; 1998.

THE ART OF GENES. E. Coen. Oxford University Press, 1999.

CIENCIA Y SOCIEDAD

Ciclo celular

Factores de transcripción Forkhead y mitosis

Por división celular se entiende el proceso mediante el cual una célula duplica su contenido genético y su masa, dando lugar a la génesis de dos células hijas.

En los seres humanos, la división celular es importante durante el desarrollo fetal y postnatal del organismo, ya que se requiere para el crecimiento y formación de nuestros tejidos. Además, la división o ciclo celular es fundamental durante el proceso de regeneración de tejidos adultos dañados y para el mantenimiento de tejidos con alto índice de renovación. Este sería el caso del epitelio intestinal, o de las células de la sangre, algunas de las cuales llegan a dividirse cada doce horas.

A las alteraciones en el proceso de la división celular hemos de atribuir un gran número de enfermedades, entre ellas los diferentes tipos de cáncer. Por esta razón, los estudios de ciclo celular han cobrado particular interés, como pone de manifiesto la adjudicación del penúltimo Nobel de medicina a tres investigadores (P. Nurse, T. R. Hunt y L. H. Hartwell) por sus aportaciones al conocimiento sobre la regulación del ciclo celular.

La división celular comienza tras el estímulo de una célula en reposo por factores de crecimiento presentes en su entorno. Estos factores de crecimiento se unen a sus receptores específicos alojados en la membrana celular y desencadenan en su interior el cambio de actividad y localización de ciertas proteínas intracelulares, las denominadas proteínas de señalización.

La razón de ese nombre se debe a la capacidad que estas proteínas poseen de indicar a la célula que se ha producido una señal externa y de promover cambios en el comportamiento celular en consecuencia. ¿Cómo proceden?

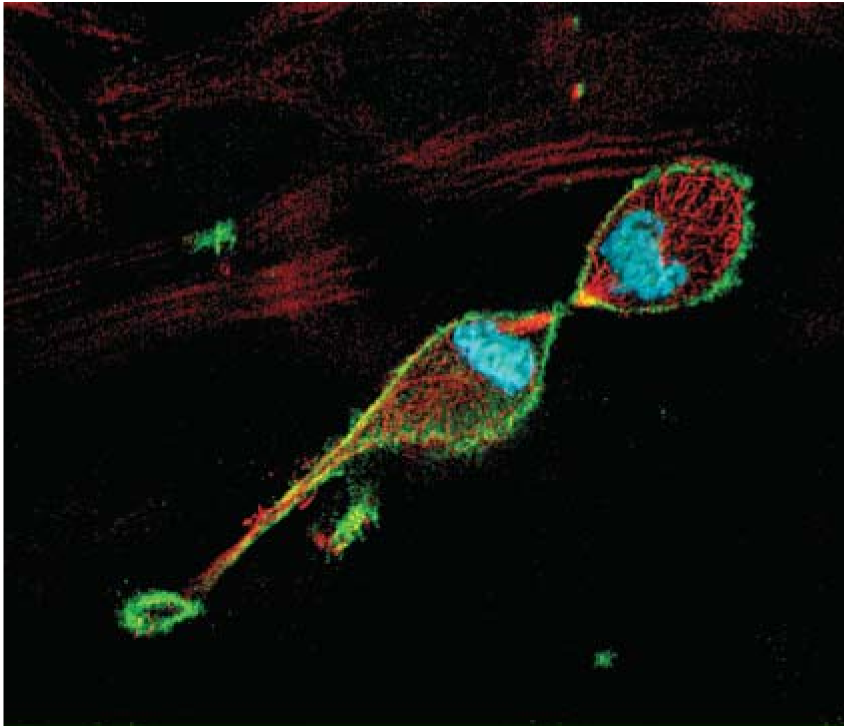
La activación de las proteínas de señalización próximas al receptor de la señal puede, a su vez, desencadenar la activación de otras proteínas en un proceso en cascada. Esta señalización intracelular en cascada normalmente culmina con la activación de los factores de transcripción. Estos factores promueven la síntesis de proteínas específicas requeridas para llevar a cabo la división celular.

Entre las proteínas que se activan primero en respuesta a los factores de crecimiento y que, formando parte de las cascadas de señalización, contribuyen a activar factores de transcripción específicos de entrada en ciclo se encuentran la fosfatidilinositol 3-quinasa y la proteína quinasa B (PKB).

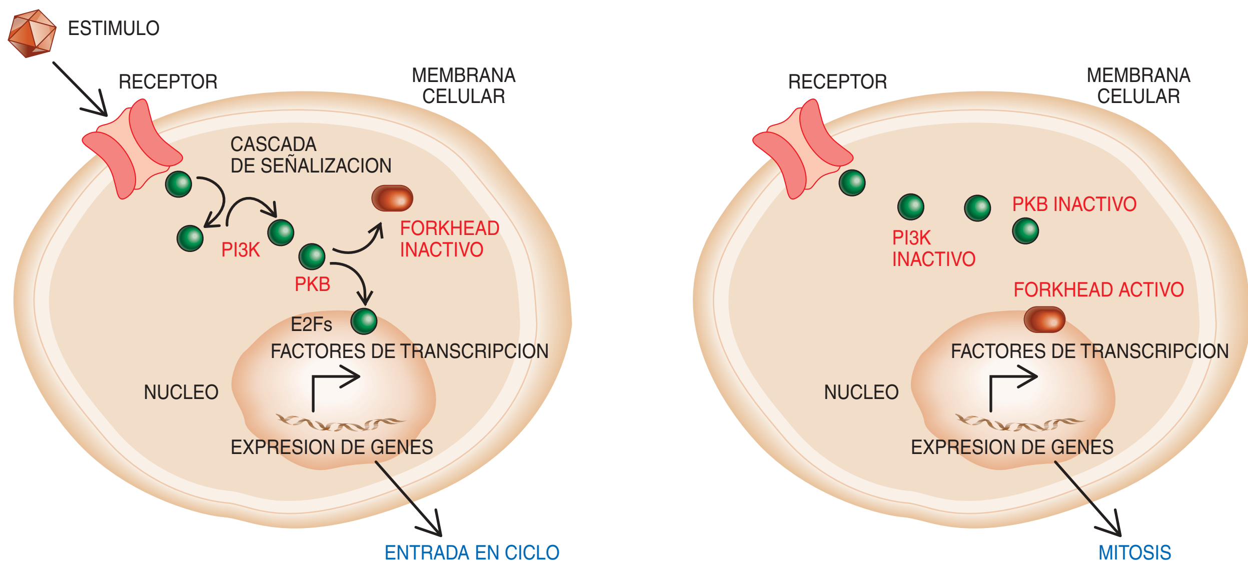
En esta primera fase de la división celular (G1), la célula ha de prepararse para duplicar su contenido genético (duplicar su ADN) y su masa celular. Sin embargo, las dos enzimas mencionadas no sólo se encargan de activar factores de transcripción (como los denominados E2F) que preparan a la célula para esta duplicación de masa y ADN. Además, fosfatidilinositol 3-quinasa y PKB inhiben la familia de factores de transcripción Forkhead, inhibición requerida para que G1 se lleve a cabo con éxito.

Una vez concluye la fase de preparación, las cascadas de entrada en ciclo se apagan y la célula procede a la segunda fase del ciclo, en la que se produce la duplicación del ADN.

La tercera fase de la división celular vuelve a ser otra fase de preparación (G2), en la que se sintetizan las proteínas necesarias para la fase final de la división celular o mitosis. En la mitosis se produce el reparto del contenido genético (en dos núcleos) y de la masa celular



1. Célula en división. Se ha teñido en azul el ADN; en rojo la tubulina y en verde la actina, ambas, proteínas estructurales



2. Se representa una célula entrando en ciclo (G1) *y otra en la fase de preparación de la mitosis* (G2). *En G1 se ilustran las cascadas de señalización de entrada en ciclo. En G2 la inactivación de estas cascadas y la activación de Forkhead*

(división del citosol) entre las dos células hijas.

Se desconoce cuáles son los factores de transcripción que gobiernan la síntesis de proteínas necesarias para la mitosis en mamíferos. Recientemente hemos descubierto que entre estos factores se encuentran los factores de transcripción Forkhead. Sin la acción de éstos se observa una síntesis deficiente de proteínas esenciales para la mitosis como la ciclina B y la quinasa Polo. En consecuencia, en células con defectos en la activación de Forkhead se aprecia una ralentización del proceso de separación de las células hijas y la aparición de células con más de un núcleo.

Nos hallamos, pues, ante un mecanismo de regulación del ciclo celular que presenta un comportamiento bimodal. Para promover la primera fase de la división celular, necesitamos que intervengan la fosfatidilinositol 3-quinasa y la PKB, al tiempo que Forkhead permanezca inactivo. Por el contrario, para la preparación de mitosis es necesaria la inactivación de ambas enzimas para permitir la activación de Forkhead y la síntesis de proteínas ejecutoras de mitosis.

Tal regulación contrapuesta constituye un mecanismo de seguridad de las células; de ese modo, antes de llevar a cabo la mitosis las células se aseguran de que las cascadas que promueven entrada en ciclo se han apagado. De no ser así, la célula ralentiza su mitosis debido a la inhibición de Forkhead inducida por fosfatidilinositol 3-quinasa y PKB.

Este mecanismo de seguridad estaría afectado o mutado en un gran número de tumores humanos, como melanoma, cáncer de próstata, carcinoma de endometrio y cáncer de mama, que presentan activación mantenida de fosfatidilinositol 3-quinasa y PKB y que, pese a ello, continúan siendo capaces de llevar a cabo la mitosis. La necesidad de Forkhead para la correcta ejecución de la mitosis plantea si estos factores podrían ser una nueva diana terapéutica para el tratamiento de tumores, aspecto no abordado todavía.

ANA C. CARRERA
y BEATRIZ ALVAREZ
Departamento de Inmunología
y Oncología, Centro Nacional
de Biotecnología (CSIC), Madrid

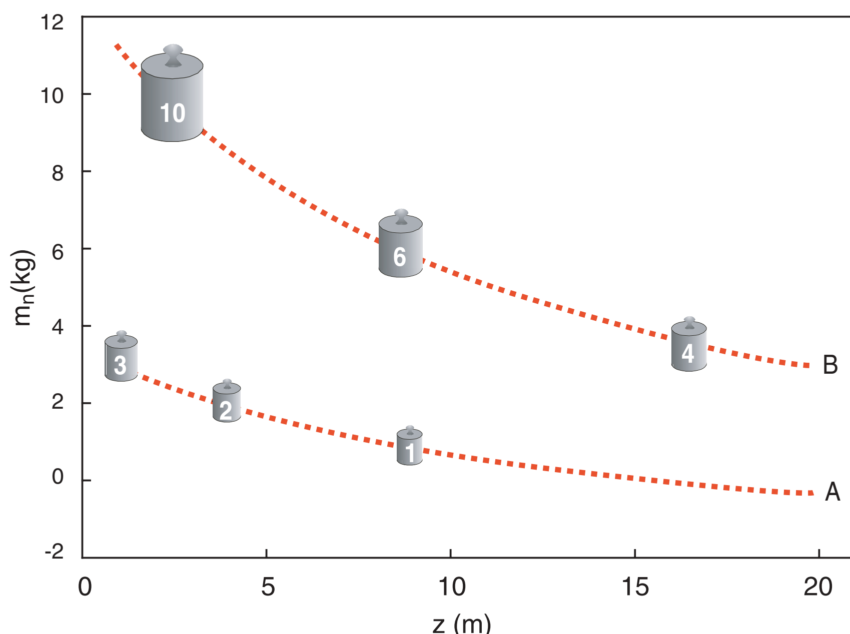
La física del buceo

A pulmón libre

El hombre se ha sentido siempre atraído por el mar, en particular por el mundo submarino. La historia nos habla de una práctica dilatada en el tiempo, representada hoy por los buscadores de perlas en Cubagua, en las costas de Cumaná, o las “ama”, buceadoras tradicionales de Corea y Japón. En los últimos años ha aumentado el interés por los deportes submarinos, gracias a la disponibilidad de equipos cada vez más seguros.

El equipo básico de buceo consta de un traje de neopreno, unas aletas, un tubo respirador y una máscara de buceo, pero conviene seguir un curso previo que nos familiarice con conceptos básicos de física. En él se nos enseñará la ley de Boyle, que relaciona el volumen de un gas (el aire de nuestros pulmones) con la presión a la que se halla sometido. Se trata de una ley útil para comprender las consecuencias que la compresión resultante de ese gas tendrá para el buceador.

Nos hablarán también de la ley de Henry, fundamento físico de las necesarias paradas de compresión-descompresión. Esta ley expresa que la solubilidad en sangre de los gases (oxígeno y nitrógeno) depende de la presión. Si estamos interesados en los factores que determinan el movimiento de un buceador en el agua, y no sólo en las leyes que se aplican en condiciones estáticas, habrá que ahondar en otros conceptos.



1. Lastre en kilogramos necesario para conseguir flotabilidad neutra a una profundidad dada (en metros). En A *se muestra el lastre necesario para un buceador sin traje de buceo y en* B *para un buceador con traje de neopreno de 5 mm de espesor*

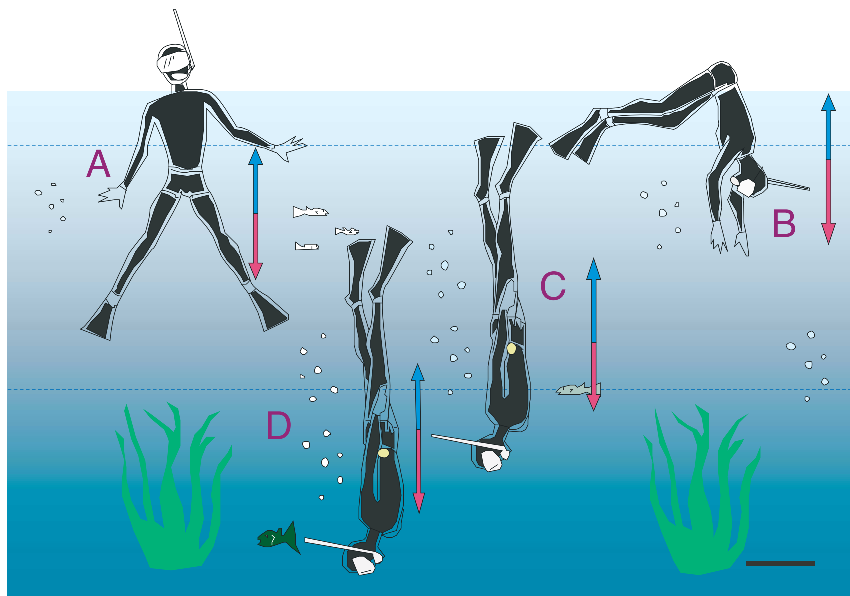
¿Por qué la flotabilidad es bastante mayor con el traje de buceo puesto, que desprovistos del mismo? Porque el traje de neopreno contiene gas (normalmente nitrógeno) en forma de pequeñas burbujas; la baja densidad resultante del traje proporciona una flotabilidad que dificulta la inmersión. Para contrarrestar este efecto, se incorpora lastre que cancele esa flotabilidad adicional: cinturones con piezas ajustables de plomo, por ejemplo. Pero, aunque la intuición nos diga que la cantidad a añadir sea la que contrarreste el empuje de Arquímedes y nos deje sin flotar ni hundirnos, no es una idea acertada.

Si siguiéramos el dictado de la intuición, podríamos sumergirnos sin demasiada dificultad, pero conforme alcanzáramos profundidades mayores empezaríamos a notar las consecuencias de la ley de Boyle. Con un aumento de presión, como el que experimentamos al sumergirnos en el agua, los gases, y en particular el aire de nuestros pulmones, el del interior de las gafas e incluso el nitrógeno del traje de buceo, empiezan a disminuir de volumen. Esta disminución de volumen no es en absoluto despreciable. Hay que tener en cuenta que, cada diez metros de profundidad, la presión sobre todo nuestro cuerpo aumenta en una atmósfera.

Aceptemos, pues, que las cavidades gaseosas de nuestro cuerpo y traje disminuyen de volumen. Dado que nuestra masa total no cambia, esa disminución de volumen significa un aumento de densidad promedio de nuestro cuerpo, lo que se traduce en un hundimiento cada vez mayor. Además, este efecto, lejos de disminuir, crecerá con la profundidad a la que nos sumergimos. Si lo despreciásemos, nos veríamos en un aprieto para volver a la superficie.

Ha de buscarse una solución de compromiso. Lo ideal, a la vista de los efectos contrapuestos señalados, sería emplear una cantidad de lastre que variara según la profundidad a la que deseemos bucear para alcanzar una flotabilidad neutra.

Por otra parte, en el buceo a pulmón libre sólo disponemos del aire inhalado antes de sumergirnos. Los buceadores expertos conocen algunos trucos para resistir más tiempo sin respirar. Evitan, por ejemplo, el desgaste físico que comporta consumo de oxígeno. El "golpe de riñón", llamado así en el argot, es un movimiento en el que, desde



2. En A *el buceador se encuentra en equilibrio: la posición de su centro de masas se indica mediante la línea discontinua. En* B *está efectuando el golpe de riñón: su centro de masas quedará un poco por encima de la posición de equilibrio. En* C *y* D*, ya totalmente sumergido, existe un pequeño desequilibrio en el sentido de flotación* (C)*; a mayor profundidad, por efecto de la compresión, el desequilibrio es hacia el fondo* (D)*. La línea de puntos muestra la profundidad en que ambas fuerzas* (flechas) *se cancelan entre sí*

la posición cabeza horizontal, pasamos a cabeza abajo, doblando el tronco y elevando posteriormente las piernas fuera del agua. Se consigue así, por un lado, que el centro de masas del buceador quede unos centímetros por encima de su posición de equilibrio y, por otro, adoptar una posición que reduce la fricción con el agua, pues ofrece una menor sección transversal. Se produce de ese modo una tendencia natural a hundirse, alcanzando y rebasando la posición de equilibrio y continuando, en ausencia de impulso adicional, hacia el fondo.

El delicado ajuste del lastre resulta también ahora vital para encontrar el desequilibrio preciso entre las fuerzas de flotabilidad o el empuje, que nos mantiene en la superficie, y nuestro propio peso, que nos arrastra hacia el fondo. Basta ese movimiento, efectuado correctamente, para hundirse una profundidad importante, antes de que necesitemos mover las aletas.

Mediante este movimiento se adquiere una velocidad sólo moderada, que es lo deseable. Con ello se evitan mayores fuerzas de fricción, que en el agua aumentan con la velocidad. Por eso los buceadores evitan los movimientos bruscos.

MARCELO AGUILELLA
Universidad Jaume I,
Castellón de la Plana



JULIO AYUSO

1. Ejemplar de carey fotografiado en la isla de La Blanquilla, Venezuela

Especies a proteger

La tortuga carey

La tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) es una de las siete especies de tortugas marinas existentes. El carey, las placas córneas que recubren su caparazón, ha sido utilizado desde la antigüedad para producir bisutería, artículos de lujo y hasta espuelas de gallos de pelea; su comercio se remonta, en efecto, a mucho antes de la era cristiana. Encontramos adornos de carey en las culturas egipcia, romana, árabe y china. También entre los mayas. Por su alto precio, que ha propiciado una intensa captura, la especie se halla hoy al borde de la extinción.

Aunque habita en todos los mares tropicales del mundo, la carey sólo anida en cinco lugares principales, cuatro de ellos en el Indopacífico y uno en la península de Yucatán. En el Caribe, en 22 de las 26 naciones donde se cuenta con información, sus poblaciones han sido extirpadas o están en franca disminución. No sólo las capturas realizadas para aprovechar su concha la amenazan. La pesca de arrastre y otras artes, la destrucción de los arrecifes coralinos (su principal hábitat), la contaminación, el saqueo de sus huevos reputados como afrodisíacos, la explotación de su carne y la ocupación de sus playas de anidación por el turismo han contribuido a hacer de esta especie una rareza.

Lo mismo que las demás tortugas marinas, la carey presenta un ciclo biológico complejo. Las hembras anidan en la playa. Hacia ellas se dirigen desde sus áreas de alimentación, cada dos o tres años. Prefieren pequeños cayos o playas aisladas y las noches oscuras y silenciosas para su nidación. Construyen el nido en la arena, a unos 50 cm de profundidad, al amparo de la vegetación costera. Regresan a anidar, a la misma playa, cada quince días; así, tres y hasta cinco veces durante la temporada.

Las nidadas constan de unos 150 huevos. Carentes de asistencia materna, eclosionan a los dos meses. La temperatura predominante define el sexo de las crías. A una temperatura de aproximadamente 29 ºC habrá mitad machos y mitad hembras; por encima de ese valor nacerán más hembras y por debajo, más machos.

Los recién nacidos, de color marrón, emergen del nido con unos cuatro centímetros de longitud de caparazón. Se encaminan inmediatamente al mar. Las crías permanecen en un entorno pelágico, movidas por las corrientes, en giros y frentes, en muchos casos asociados a masas de algas. Se alimentan de organismos flotantes los tres primeros o siete años de vida.

Cuando miden ya unos 25 cm de longitud, adquieren su coloración típica de abigarrados tonos de amarillos y marrones. Pasan a establecerse en áreas coralinas o de fondos duros, a menudo a cientos de kilómetros de la playa de nacimiento. Los grupos de juveniles están formados por animales provenientes de diversas playas de origen. En tales ambientes, se alimentan de diversos invertebrados (esponjas, tunicados y zoántidos), así como de algas.

La calidad del hábitat y la abundancia de su alimento condicionan la velocidad de crecimiento. En general la etapa juvenil dura unas dos décadas. A los 25 o 30 años de vida, con una talla de unos 70 cm de lon-



DIDIHER CHACON (*Asociación ANAI*)

2. Brazaletes de carey procedentes de un decomiso en Costa Rica

gitud, la mayoría de las hembras alcanzan la madurez sexual y realizan su primera migración reproductiva.

Cada dos o tres años, dependiendo de las reservas energéticas que la calidad y cantidad de alimento en su ambiente les han permitido acumular, las carey se dirigen a las playas de anidación. En muchos casos en países a cientos de kilómetros de distancia de donde se alimentan. (Por eso la especie constituye un recurso de carácter internacional.)

Las hembras permanecen en la zona de anidación unos meses, muchas veces sin acceso a zonas apropiadas para nutrirse. Cumplido el ciclo reproductor, regresan a la zona de alimentación. Pese a tan largas migraciones y movimientos regionales, lo mismo adultos que recién nacidos evidencian una gran capacidad de fijación del sitio. Vuelven a la misma playa de anidación temporada tras temporada durante años. Durante años también ocupan el mismo arrecife, hasta el punto de que no es infrecuente hallar los mismos individuos en determinado paraje.

Aunque los adultos siguen habitando en zonas coralinas, optan por estratos algo más profundos que los juveniles. Se ha observado que ciertos hábitats se distinguen por su dieta especializada, basada exclusivamente en esponjas; en ocasiones incluso de una sola especie. Este tipo de dieta desempeña un importante papel en la salud de los arrecifes, pues el epizoísmo constituye una de las mayores amenazas para los corales.

La mandíbula en forma de pico le permite a la carey extraer invertebrados de las grietas entre los corales, así como romper organismos incrustantes de consistencia dura, modificando su hábitat. Es probable que el aumento espectacular del número de esponjas y otros organismos en los corales, experimentado por muchos arrecifes, se deba en parte a la ausencia de una población normal de carey.

¿Cuántas carey es una cifra normal? ¿Cuántas habitaban antaño los mares tropicales? Aunque se ignora, algunos datos arrojan luz: Japón, un consumidor habitual, importó entre 1970 y 1990 el carey de 710.000 tortugas; Taiwán, sólo en 1978, el de 120.000, el 60 % proveniente del Caribe. En esos años, la mayoría de las poblaciones de carey se hallaba muy disminuida tras siglos de explotación. No obstante, se trata de cifras muy superiores a las posibles capturas actuales en todo el mundo.

La gran dispersión de la anidación de las carey —pocas hembras que ponen los huevos en nidos muy alejados una de otra— dificulta el establecimiento de programas de protección en un ambiente tan crítico para su ciclo biológico como es el del período reproductor. Su supervivencia depende de la educación y del estricto cumplimiento de las leyes.

JOAQUÍN BUITRAGO
Estación de Investigaciones Marinas, Isla Margarita, Venezuela

Enfermedad de Charcot-Marie-Tooth

Su etiología génica

En 1886, Jean-Martin Charcot y Pierre Marie, en París, y Tooth, en Londres, describieron el síndrome de atrofia muscular peroneal. Este cuadro clínico se caracteriza por atrofia de la musculatura de la pierna, debilidad muscular, ausencia de los reflejos osteotendinosos y pie cavo. La marcha es típica, elevándose las rodillas más de lo normal para levantar el pie del suelo. La musculatura de las manos y de los antebrazos puede hallarse también resentida.

A lo largo del siglo XX se fueron perfilando los rasgos distintivos del síndrome, que recibe ahora la denominación de enfermedad de Charcot-Marie-Tooth (CMT). Afecta a todos los nervios del organismo, tanto motores como sensitivos. Aunque ofrece, además, una gran variabilidad clínica, morfológica y electrofisiológica, podemos reducir a dos las formas fundamentales. En la primera, el trastorno afecta primariamente la mielina del nervio (CMT1 o desmielinizante); en la segunda, la lesión primaria ocurre en el axón neuronal (CMT2 o axonal). Considerada en su conjunto, la prevalencia de la enfermedad de Charcot-Marie-Tooth se cifra en 1 cada 3500 habitantes.

La neuropatía tiene su origen en mutaciones génicas. Se han observado distintos patrones de herencia monogénica o mendeliana. Las formas más frecuentes son autosómicas dominantes, en las que, para desarrollar la enfermedad, basta la presencia de una mutación en una de las dos copias o alelos del gen. En cambio, los casos de herencia autosómica recesiva requieren la mutación de ambos alelos. También puede transmitirse con herencia ligada al cromosoma X. Asimismo, puede haber quien la padezca por mutación de nueva aparición.

En los últimos 15 años se han registrado notables progresos en el conocimiento de las bases moleculares y genéticas de la enfermedad de Charcot-Marie-Tooth. Se han reconocido ya más de 25 loci genómicos involucrados en la etiopatogenia de la enfermedad y de otras neuropatías relacionadas. Se ha identificado y caracterizado 15 genes mutantes.

Sabemos ahora que predomina el gen *PMP22*, localizado en el cromosoma 17. La mutación más frecuente consiste en una duplicación de la región genómica (1500 kilobases). Se presenta en el 60 % de

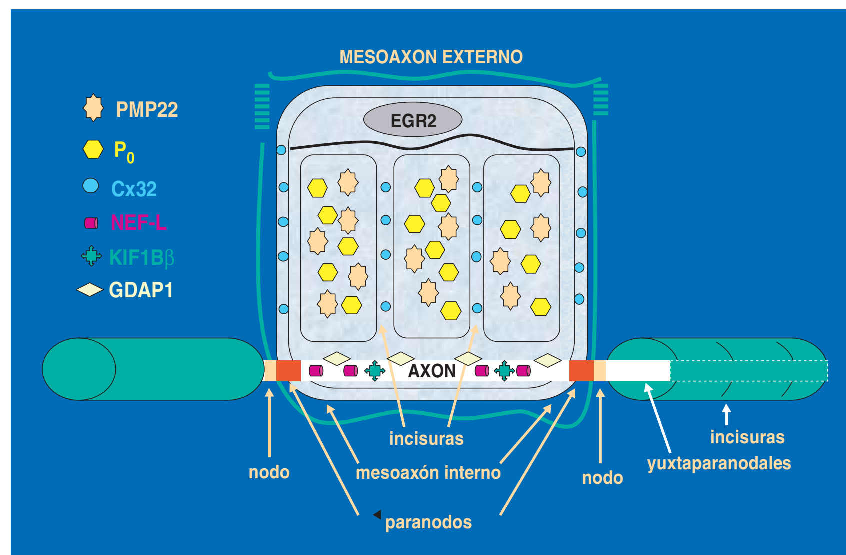
las familias. El nervio no tolera la presencia de tanta carga génica de *PMP22* y se desarrolla una neuropatía desmielinizante, llamada CMT1A. El proceso inverso, la deleción de bases de la misma región genómica, provoca la neuropatía hereditaria con susceptibilidad a la parálisis por presión.

Ambas mutaciones, duplicación y deleción, resultan de un mismo mecanismo genético: el entrecruzamiento desigual entre cromátidas no hermanas de los cromosomas 17 durante la división meiótica, especialmente a lo largo de la espermatogénesis masculina.

Son también bastante frecuentes las mutaciones puntuales en otros genes. En particular, del gen *MPZ*, que codifica la proteína de mielina P_0, del gen *GJB1*, que codifica la proteína conexina 32, o el propio gen *PMP22*. Las proteínas determinadas por estos tres genes se expresan en la mielina del nervio. En su conjunto, la mutación operada en dichos genes condiciona la etiología del 70 % de las distintas formas de la enfermedad de Charcot-Marie-Tooth.

El patrón mendeliano para las formas mutantes en *PMP22* y en *MPZ* es la herencia autosómica dominante. Muchos de los casos esporádicos se deben a la aparición *de novo* en el paciente de la duplicación de 1500 kilobases. (Sus progenitores no habían experimentado ninguna alteración.) En los casos de mutación en el gen *GJB1* la herencia está ligada al cromosoma X.

Las causas genéticas que dan cuenta del 30 % restante se reparte entre un número creciente de genes que se han venido describiendo en los últimos años. Varios de ellos se presentan en unas pocas familias, bien con patrón autosómico dominante, bien con patrón autosómico recesivo. Una de estas formas es la neuropatía sensitivo-motora Lom, descrita en familias de etnia gitana. En ella se asocia sordera de aparición hacia el final de la segunda década de la vida. Todos los enfermos, sea cual sea el país europeo de donde procedan, incluida España, presentan la misma mutación en el gen *NDRG1*, lo que indica un origen común ancestral de esta neuropatía.



Vista esquemática de un axón mielinizado y de una célula de Schwann que conforma la vaina de mielina. Desenrollada, la célula de Schwann muestra el núcleo, la mielina compacta y la mielina no compacta, incluidos paranodos e incisuras de Schmidt-Lantermann. También se indica la localización de los nodos de Ranvier. Algunas de las proteínas de la célula de Schwann y del axón, asociadas a distintas formas de neuropatía de Charcot-Marie-Tooth, están ilustradas en color en su ubicación en las diferentes estructuras. PMP22 y P_0 son proteínas estructurales de la membrana de la mielina compacta; Cx32, una proteína de unión de intervalo ("unión gap") de la mielina no compacta (nodos de Ranvier e incisuras); NEF-L, es el neurofilamento ligero; KIF1Bb, un motor molecular de las familias de las quinesinas; GDAP1 es una proteína que presenta homología con las glutatión S-transferasas; EGR2 es un factor de transcripción

Nuestro grupo ha caracterizado, recientemente, el gen responsable de una forma grave de enfermedad de Charcot-Marie-Tooth en familias españolas con herencia recesiva y que asocian una disfonía y parálisis de cuerdas vocales. La lesión primaria del nervio puede ser axonal en unas familias o desmielinizante en otras. Las mutaciones halladas impiden la correcta expresión del gen *GDAP1*, cuya función se desconoce.

La enfermedad de Charcot-Marie-Tooth muestra una etiología génica muy heterogénea. Las proteínas sintetizadas por estos genes cumplen distintas funciones en el nervio periférico. Hay proteínas estructurales de mielina, proteínas de uniones intercelulares, factores de transcripción, componentes del citoesqueleto del axón y proteínas involucradas en el crecimiento y diferenciación celular, entre otras.

El conocimiento que nos aporta toda esta información génica y genética tiene su inmediata aplicación en el diagnóstico molecular y en el consejo genético. Además, nos permite comprender mejor la fisiopatología de la enfermedad y las posibles dianas terapéuticas hacia donde dirigir futuras investigaciones.

Desde una perspectiva biológica, la determinación de los genes y proteínas implicados en la etiopatogenia de la enfermedad de Charcot-Marie-Tooth nos ayuda a definir cuáles son las moléculas de interés en el desarrollo y función de los nervios, esas estructuras longilíneas que permiten que nos comuniquemos con el mundo exterior, remitiendo las sensaciones hacia nuestro cerebro y posibilitando una respuesta adecuada a través de los músculos que inervan.

FRANCESC PALAU
Laboratorio de Genética
y Medicina Molecular
Instituto de Biomedicina
de Valencia, CSIC
Valencia

Texto y fotos: Josep-Maria Gili, Pablo López González, Núria Teixidó y José Manuel Fortuño

Una armadura perfecta

En los sistemas acuáticos, y muy especialmente marinos, observamos distintos grupos zoológicos que incorporan elementos inorgánicos disueltos en el medio, para formar sus propios elementos esqueléticos. Se trata, además, de una hábil estrategia de defensa. La naturaleza inorgánica de esas armas puede estar basada en silicatos (en la mayoría de las esponjas) o en carbonatos (en moluscos, equinodermos u octocorales).

De esos minerales se valen para formar grandes caparazones o esqueletos externos (muchos moluscos, madreporarios, etc.) o elementos internos genuinos (esponjas, equinodermos, octocorales, etc.). Estos últimos, microscópicos en ocasiones, constituyen auténticos endoesqueletos, con una disposición que nada tiene que ver con el azar. Nos referimos a las espículas o escleritos, que se imbrican a modo de tejas o disponen en complejos entramados que desempeñan un papel muy importante, no sólo para la propia defensa mecánica, sino también para sostén y operatividad de las estructuras internas.

Si nos ceñimos a los octocorales, nos maravillará su repertorio de formas, tamaños y disposiciones de los escleritos calcáreos a lo largo de los ejes y pólipos. El conjunto de escleritos conforma una especie de armadura que disuade a muchos predadores potenciales, al tiempo que facilita los procesos de retracción y expansión de los pólipos, imprescindibles para la obtención de las partículas nutritivas en suspensión. Estas armaduras también deben tener suficiente poder de acomodación para soportar las necesidades impuestas por su ciclo reproductor.

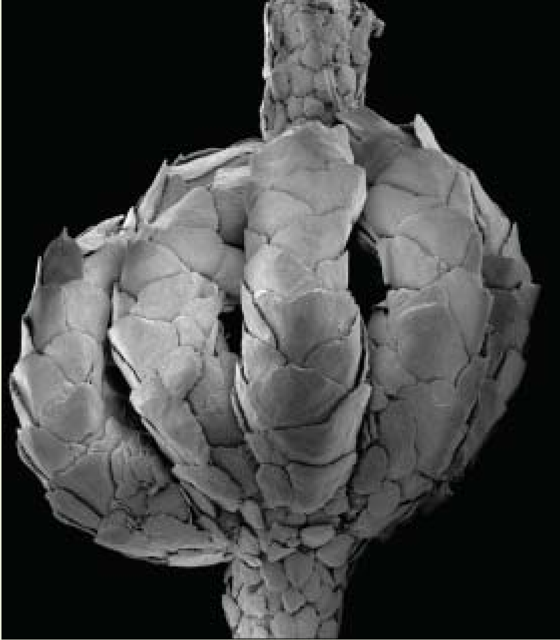
En las altas latitudes antárticas resulta muy frecuente que los pólipos de muchas gorgonias limiten su inversión reproductora produciendo pocas larvas. Cada larva puede alcanzar casi el tamaño de un pólipo que no esté en reproducción, modificando durante su madurez el aspecto del pólipo. El endoesqueleto debe ser suficientemente adaptable para permitir el crecimiento de la larva en el interior del pólipo y hacerse cargo de la protección eficaz de la futura progenie hasta el momento de su emisión al exterior.



1. Fondos antárticos en el sector oriental del mar de Weddell a 70 m de profundidad dominados por gorgonias del género Arntzia



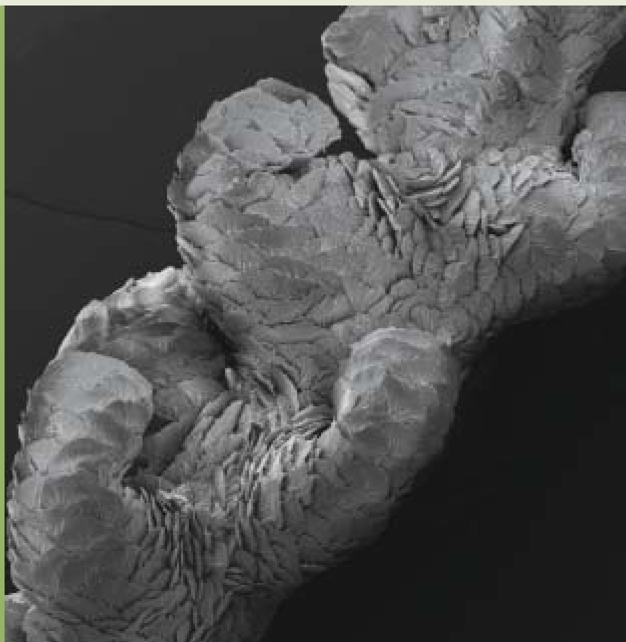
2. *Colonia del género* Thoarella. *Se aprecian los pólipos en reproducción en la zona más próxima al eje. (Fotografía de Martin Rauschert, AWI-Bremerhaven-Alemania)*



3. *Eje de gorgonia del género* Primnoella. *En esta fotografía realizada con un microscopio electrónico de barrido, técnica empleada también en las ilustraciones siguientes, se distingue un verticilo de pólipos (de 2 mm de largo) cubiertos por escleritos en forma de escamas. Para poder observar la disposición de los escleritos, se ha retirado el epitelio que los cubre*



4. *Dos pólipos (de 1 m de largo) de gorgonia del género* Arntzia. *En la base de los mismos se observan los restos del epitelio que los cubre*



5. *Fragmento del eje de gorgonia del género* Fannyella, *donde se observan pólipos (1 m de largo) cubiertos por escleritos en forma de abanico imbricados. El pólipo central presenta la base ensanchada: se halla incubando una larva; el resto no se encuentran en reproducción*



6. *Pólipo (1 m de largo) de gorgonia del género* Fannyella *en el que se destaca la disposición imbricada de los escleritos en forma de abanico a lo largo de su cuerpo, mientras que los de la abertura tienen forma triangular*



Nuevas técnicas de difusión están obviando las restricciones a la difusión de programas y películas estadounidenses

Harvey B. Feigenbaum

GLOBALIZACION

Uno de los capítulos más importantes de las exportaciones de los Estados Unidos corresponde a la "cultura popular". Ese país vende todos los años a clientes de todo el mundo música, libros, películas y programas de televisión y de ordenador por valor de más de 60.000 millones de euros. En tal estimación ni siquiera se cuentan los ingresos logrados mediante copias ilegales u otras formas de piratería. En Europa o en Canadá, basta conectar la televisión, comprar un disco compacto u ojear la sección de espectáculos para comprobar la ubicuidad de la cultura estadounidense.

Muchos gobiernos han observado con alarma esta tendencia en los últimos decenios. Por temor a perder las tradiciones culturales que les son propias, diversas naciones han adoptado una política de protección de sus productores de música, libros, revistas, películas y programas de televisión. Entre las técnicas más eficaces para preservar la diversidad cultural está la imposición de cuotas que limitan el número de películas proyectadas y de programas de televisión emitidos procedentes de Estados Unidos. En 1989, la Unión Europea emitió su directiva "Televisión sin fronteras", que exigía a los estados miembros que reservasen la mayor parte de su horario de televisión para programas de producción europea "donde fuera practicable". Algunos estados de la UE van más allá todavía: en Francia, por ejemplo, al menos el 60 por ciento del tiempo ha de corresponder a programación europea, y el 40 por ciento ha de ser, en concreto, francesa. En Australia, al menos el 55 por ciento del horario comprendido entre las 6 de la mañana y la medianoche está reservado para programas y películas australianas. En Corea del Sur la programación extranjera no puede ocupar más que el 20 por ciento de las emisiones aéreas de televisión, es decir, las que se radian por antenas, por contraposición con las que se transmiten por cable. El gobierno canadiense reserva el 60 por ciento de las emisiones por antena a los programas canadienses.

Pero ahora las nuevas técnicas de distribución de películas y de difusión de programas de televisión amenazan derribar estas barreras nacionales. En Europa y en Asia, las compañías de televisión por satélite están ofreciendo ya a sus suscriptores una mezcolanza de programas dominada por los espectáculos estadounidenses. Y la tan cacareada introducción del vídeo a petición —bibliotecas de programas que permiten a los consumidores seleccionar sus programas o sus películas favoritas— va a provocar una grieta más en el sistema de cuotas. Quizás algún día sea posible en todo el mundo eludir por completo el sistema de cuotas merced a la transmisión de películas y programas por Internet.

Así pues, ¿servirán estas nuevas técnicas para expandir aún más el alcance de la "cultura popular" estadounidense? La respuesta no es tan sencilla. El advenimiento del vídeo digital ha rebajado muchísimo el coste de producción de una película o un espectáculo de televisión, lo que abre la posibilidad de que productoras con presupuestos reducidos compitan más eficazmente con



ENRIC MARTI *AP Photo*

MUJERES AFGANAS en Kabul junto a una tienda de antenas parabólicas.

sus homólogas de Hollywood. Y aunque los programas y películas estadounidenses se proyecten en mayor número de pantallas, no está claro que las demás culturas vayan a sufrir peligro. Es muy posible que el impacto cultural de las películas y la televisión esté siendo exagerado.

La amenaza tecnológica

La primera técnica que plantó cara a las cuotas de emisión fue la difusión directa desde satélite (DDS). La DDS, muy extendida en Europa y en algunas partes de Asia, permite que los espectadores reciban programas mediante una antena parabólica no mucho mayor que una bandeja. Gran parte de los programas son estadounidenses, porque el costo de las licencias de los programas de TV estadounidenses se sitúa, de ordinario, entre la tercera y la décima parte de las correspondientes a las producciones de otros países. (Los programas estadounidenses se benefician de la economía de escala debida a su gran mercado interno. En EE.UU., los programas de mayor éxito se venden primero a una cadena nacional, después se reponen en los canales de televisión locales y por último se revenden a cadenas de otros países. Como los programas se revenden muchas veces, les resulta posible a los productores exigir derechos de licencia más reducidos.) En Europa, compañías como Turner Network Television y Cartoon Network pasan sus programas en varios canales de sonido, lo que permite su difusión en diversos idiomas.

La Unión Europea autoriza a los estados miembros a imponer las cuotas legitimadas por la directiva “Televisión sin fronteras” y los tribunales europeos han ampliado a la difusión por satélite las legislaciones nacionales sobre cuotas. Pero la realidad es que muy poco puede hacer un país contra las emisiones

de DDS que no respeten la normativa, sobre todo si la compañía que ofrece la DDS no tiene su sede en un estado de la Unión Europea. La única opción sería interferir las señales de los satélites, pero muy bien podría suscitar protestas diplomáticas. En cualquiera caso, el Tribunal Europeo de Justicia ha dictaminado que los estados miembros no pueden adoptar "medidas excesivas" a fin de bloquear la recepción transfronteriza de televisión.

El sistema de "vídeo a petición", posible merced al vídeo digital, plantea una amenaza más al sistema de cuotas. En la televisión analógica ordinaria, la emisora ha de transmitir 25 imágenes por segundo (30 en EE.UU.) para cada canal. Pero el vídeo digital convierte las imágenes en datos numéricos y se han ideado procedimientos muy ingeniosos para comprimir esa avalancha de datos. Como no todos los elementos de una imagen de televisión están en movimiento, sólo es necesario transmitir los píxeles que cambian de una a otra. La reducción del tamaño de cada transmisión de vídeo multiplica en gran medida la capacidad de transmisión de la banda de frecuencias de que dispone la emisora, es decir, el número de programas que pueden ser enviados por cable hasta los usuarios. Gracias a la compresión digital, los servicios de televisión por cable ofrecen un extenso catálogo de películas y programas de televisión que se encuentran a disposición de los espectadores en el momento que deseen.

Las compañías estadounidenses llevan años desarrollando sistemas de vídeo a petición. En la actualidad esta técnica está empezando a echar raíces en Europa y en Asia; se ofrece ese servicio en Portugal, en Suecia y en Hong Kong. Abre una brecha en el sistema de cuotas, porque se basa estrictamente en las preferencias de los espectadores. Es inverosímil que los televidentes presten mucha atención a las cuotas de asignación nacional a la hora de decidir qué programas desean ver. Sylvie Perras, antigua asesora del Ministerio de Cultura francés, pronostica que a lo largo de los 10 años venideros el crecimiento del vídeo a petición va a mermar la eficacia del sistema de cuotas.

El golpe definitivo a las cuotas de emisión lo dará la transmisión de vídeo por Internet, pero esta técnica dista de hallarse a punto. Los estudios de Hollywood están experimentándola ya. Este sistema permitiría a los consumidores la selección de una película de larga duración en una biblioteca de la Red y descargarla en sus domicilios. Dado que la cantidad de datos necesarios para reconstruir una película de dos horas de duración es enorme, es probable que la descarga exigiera varias horas: habría que solicitar la película por la mañana para tenerla disponible al atardecer. El usuario habría de disponer de capacidad de almacenamiento suficiente, sea en un ordenador personal, en un televisor digital o en un receptor acoplado al televisor, donde se iría guardando la película hasta que estuviese en condiciones de ser vista. Por otra parte, los estudios tendrían que desarrollar sistemas de encriptación y salvaguardas digitales para impedir la copia no autorizada.



TEMEROSOS DE LA INFLUENCIA de los programas de cine y televisión estadounidenses, son muchos los países que obligan a las cadenas a reservar la mayor parte de su horario a programas de producción local. Ofrecemos aquí una muestra de las cuotas de emisión adoptadas por diversos gobiernos.

**Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Holanda, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Portugal, Reino Unido y Suecia.*

JOYCE PENDOLA

Una solución más sencilla podría ser el *streaming* de vídeo: la visión de una película o programa de televisión vía Internet sin tener que descargarla previamente. La utilizan ya programas informáticos bien conocidos, como el Real Player, pero las aplicaciones actuales sólo ofrecen, por lo normal, pantallas muy pequeñas, y a menudo las imágenes son borrosas y sufren saltos. Es probable que la calidad del vídeo difundido por la Red mejore con el tiempo, conforme sean más los usuarios que dispongan de conexiones de banda ancha a Internet. Pero la difusión basada en Internet adolece también de un problema económico. Los costes de la difusión tradicional son fijos, por lo que su renta-

Resumen/*Tecnología frente a diversidad*

- **Muchos países, temiendo la pérdida de sus peculiaridades culturales, han impuesto limitaciones a la cantidad de programación estadounidense que se puede ofrecer en televisión. Pero técnicas nuevas, como la retransmisión por satélite, el vídeo a petición e Internet amenazan con hacer inútil el sistema de cuotas.**
- **Al mismo tiempo, el advenimiento de las cámaras de vídeo digital, del montaje y posproducción por medios informáticos, y de la proyección por medios digitales puede reducir los costes de producción de películas y espectáculos televisivos; así, los productores nacionales competirían mejor con los estudios de Hollywood.**
- **Los gobiernos preocupados por el peso de los espectáculos audiovisuales estadounidenses tal vez debieran considerar la sustitución de las cuotas por subsidios bien elegidos.**

UN MUNDO DE CUOTAS



bilidad crece con la dimensión de su audiencia. En el *streaming* de vídeo, sin embargo, cada nuevo espectador incrementa el costo de difusión del programa, lo que tiende a disminuir los beneficios. Por todo ello, y aunque Hollywood sigue alentando grandes esperanzas en la técnica del *streaming*, los progresos en esta técnica no constituyen todavía una amenaza para los sistemas nacionales de cuotas.

Guerrillas digitales

Aunque el futuro de las cuotas de emisión no parece muy seguro, la revolución digital tienen otros efectos que quizá frenen la entrada a degüello de los programas estadounidenses. Las cámaras de vídeo digital y el montaje y edición computarizados han reducido muchísimo —y de esos efectos, éste quizá sea el más importante— los costos de producción de largometrajes, documentales y programas de televisión. La reducción de costos permitiría a los productores de otros países bajar los precios de sus licencias; les ayudaría a competir con las producciones estadounidenses en los mercados del cable y del DDS, que están muy fragmentados. Si tienen ocasión, los espectadores suelen preferir producciones de sus propios países; de hecho, cuando los estudios estadounidenses elevaron hace poco sus derechos en el caso de algunos espectáculos de máxima audiencia, las cadenas europeas los reemplazaron por programas desarrollados en sus respectivos países.

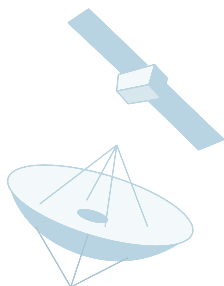
El autor

HARVEY B. FEIGENBAUM es profesor de ciencias políticas y decano asociado de la Escuela Elliott de Asuntos Internacionales de la Universidad George Washington. Investiga las interacciones entre la tecnología, la política y la economía en los estados industriales avanzados, en especial en Europa occidental. Se doctoró en ciencias políticas por la Universidad de California en Los Angeles en 1981. Desea agradecer la ayuda de David Furth, de la Comisión Federal de Comunicaciones, y la de David Soothill, de la cadena australiana de televisión SBS. La investigación necesaria para este artículo ha sido financiada en parte por el Centro George Washington de estudios sobre la globalización.

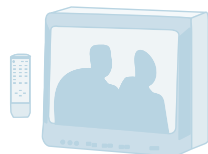
TECNICAS DEL ESPECTACULO Y DIVERSIDAD CULTURAL

ES MUY PROBABLE que algunas técnicas nuevas debiliten el efecto de las cuotas de difusión. Programas y películas estadounidenses aún se verían más fuera de EE.UU. Otras técnicas, en cambio, pueden alentar la diversidad cultural, al estimular la producción televisiva y cinematográfica en todo el mundo.

TECNICAS QUE DEBILITAN EL SISTEMA DE CUOTAS



DISTRIBUCION POR SATELITE
La programación difundida directamente desde satélite suele estar dominada por espectáculos estadounidenses. La regulación de estas emisiones puede no resultarles sencilla a los gobiernos.

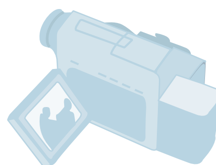


VIDEO A PETICION
La compresión digital permite a los proveedores ofrecer una amplia selección de películas y programas de televisión. Los espectadores preferirían quizá los espectáculos estadounidenses a la producción local.

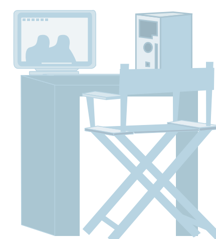


VIDEO POR INTERNET
Quienes dispongan de conexión a Internet podrían descargar películas y programas de televisión estadounidenses para verlas una vez almacenadas en sus equipos, o verlos en tiempo real mediante las descargan (*videostreaming*).

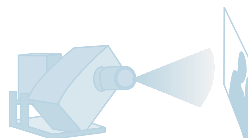
TECNICAS QUE ESTIMULAN LA PRODUCCION DE PELICULAS Y DE TV



CAMARAS DE VIDEO DIGITALES
Las nuevas cámaras de vídeo digital hacen más sencilla y barata la creación de películas y espectáculos de televisión; con ellas, los productores independientes pueden competir mejor con los estudios de Hollywood.



MONTAJE INFORMATIZADO
El montaje por edición de vídeo digital es mucho más económico que cortando y pegando película. También pueden utilizarse los ordenadores en la posproducción para generar efectos especiales de gran calidad.



PROYECCION DIGITAL
Los productores independientes podrían recortar los gastos de distribución mediante el envío por medios digitales de los filmes hasta las salas de exhibición, en lugar de remitirles rollos de película.

JOYCE PENDOLA

El vídeo analógico ordinario no puede igualar ni la resolución ni la calidad de la película de 35 mm, pero las videocámaras digitales más recientes proporcionan más o menos la misma resolución que una cámara de 35 mm y una profundidad de campo mayor. Este desarrollo ha puesto la producción de películas al alcance de un número mucho mayor de productores independientes, que ya no tienen necesidad de película ni de revelado (gastos que a menudo se cuentan entre los mayores de una película de pequeño presupuesto). Más todavía, la reducción de costes puede redundar en aumento de la calidad. En las películas de bajo presupuesto, la relación típica entre metraje rodado y metraje útil es de 3 a 1: un metro de película montada por cada tres impresionados en el rodaje. Con las cámaras digitales no es necesario preocuparse del metraje malgastado, por lo que la relación puede llegar a ser de 50 a 1. Además, para rodar la escena, el director puede utilizar más de una cámara y seleccionar luego los fragmentos con mejor ángulo. En el rodaje convencional, utilizar más de una cámara es un lujo que, en muchos casos, ni siquiera los mayores estudios pueden permitirse.

También las innovaciones en la posproducción han reducido costes. El vídeo digital puede editarse en un ordenador, proceso mucho menos costoso, en tiempo y dinero, que el montaje por corte del negativo [*véase* “Transición en el rodaje”, por Peter Broderick, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2001]. Incluso un ordenador personal permite crear efectos especiales espectaculares que costarían millones de euros si fueran realizados por una productora de Hollywood. Aunque no todas las películas pueden ofrecer resultados como los de *El señor de los anillos*, los efectos computarizados se encuentran hoy al alcance los realizadores de todas partes.

La digitalización del vídeo puede contribuir también a eliminar una de las principales dificultades de los realizadores europeos y asiáticos: conseguir que sus películas lleguen a ser proyectadas. En el Reino Unido,

por ejemplo, las principales compañías distribuidoras están controladas por firmas norteamericanas, a las que interesa por encima de todo distribuir películas estadounidenses en vez de británicas. La consecuencia es que en el Reino Unido resulta casi imposible ver una película británica, a menos que sea una comedia. Tampoco en Francia son las compañías de distribución lo suficientemente grandes para competir con las de propiedad estadounidense. Aunque Francia cuenta con una próspera industria cinematográfica, alrededor del 60 por ciento de la recaudación en taquilla de ese país procede de películas estadounidenses.

Una de las razones del dominio norteamericano de la distribución de películas es económica. En el caso de una película de gran difusión, la fabricación y expedición de las copias hasta los cines cuesta incluso 3 millones de euros. El vídeo digital, en cambio, puede transmitirse directamente vía satélite hasta las salas, donde se le descargará y proyectará. A pesar de que los proyectores digitales cuestan hoy cinco veces más que los proyectores de película ordinaria, el precio debería ir reduciéndose con el tiempo. Al disminuir los costos de distribución, los multicines de todo el mundo podrán exhibir más películas de bajo presupuesto que no hayan sido realizadas en Hollywood.

El temor a la influencia cultural

Aunque muchos gobiernos están preocupados por la posición dominante de espectáculos estadounidenses, resulta muy difícil determinar en cuánta medida influyen en otras culturas películas como *Titanic* o series de televisión como *Los vigilantes de la playa*. Uno de los estudios más fascinantes sobre este problema fue el que realizaron hará unos quince años Elihu Katz y Tamar Liebes, de la Universidad Hebrea de Jerusalén. Kats y Liebes constituyeron grupos diana formados por personas de distintas nacionalidades, entre ellas, estadounidenses, árabes, rusos y japoneses, e hicieron que todas vieran un mismo episodio de *Dallas*. A continuación, los participantes comentaron el episodio en sus idiomas nativos.

Katz y Liebes hallaron que todos los grupos diana comentaron los mismos temas generales —éxito, honor, relaciones familiares, roles sexuales, etc.—; sacaron de ahí la conclusión de que la serie "puede realmente establecer un motivo de reflexión y debate". Los distintos grupos, por otra parte, captaron el programa de formas radicalmente diferentes, y con frecuencia lo interpretaron desde su perspectiva cultural propia. Los árabes apreciaron "degeneración moral", mientras que los rusos vieron "podredumbre capitalista." Unicamente los norteamericanos comentaron las interdependencias mercantiles de los personajes. Algunos miembros del grupo árabe llegaron incluso a confundir el argumento del episodio, para hacerlo más compatible con sus mores: entendieron que una de las actrices representaba una mujer casada que huía a la casa de su padre, cuando en realidad se mudaba a la casa de su antiguo amante y del padre de éste.

El estudio sugiere que la televisión estadounidense puede no tener tan gran influencia como de ordinario se cree, porque sus mensajes son contemplados a través del filtro de la cultura receptora. Sin embargo, otros sociólogos han rebatido esta conclusión, objetando que años de ver la televisión pudieran provocar efectos que no serían apreciables con el método de Katz y Liebes.


Una escena de *Dallas*

COLECCION EVERETT

Subsidios en vez de cuotas

Como es obvio, también los estudios de Hollywood cosecharán para sí muchos de los beneficios que reporta el vídeo digital. Es concebible que la producción y distribución digital sirva para facilitar aún más la penetración de los espectáculos estadounidenses en todo el mundo. Ahora bien, ¿constituye la exportación de tales espectáculos una verdadera amenaza para las demás culturas del mundo? A pesar de la mucha tinta vertida sobre el tema del "imperialismo cultural," la sociología no ha podido demostrar que realmente se esté produciendo tal fenómeno (*véase el recuadro* "El temor a la influencia cultural"). Es innegable, desde luego, que los espectáculos estadounidenses han tenido cierto impacto sobre otras sociedades, aunque sólo sea porque proporcionan un sistema nuevo de referentes culturales. Si es misión del Estado la preservación de la cultura e identidad nacionales, la pérdida de eficacia del sistema de cuotas de emisión merecerá la atención de los gobiernos.

Un paso posible consiste en que los países sustituyan el sistema de cuotas por otro de subsidios para sus productores de películas y programas de televisión. El problema, empero, consiste en saber qué clase de subsidios se han de conceder y a quiénes. En el pasado, los productores europeos han contado con las ayudas de los programas Media y Media II de la Unión Europea. Más recientemente, la UE ha introducido Media Plus, que subsidia sobre todo la distribución y la mer-

cadotecnia. Por otra parte, algunos países han establecido subsidios propios. En Francia, las cadenas de televisión han de aportar el 3 por ciento de sus ingresos para subsidiar la producción cinematográfica, y Canal Plus, el más importante de los operadores de pago, ha de aportar el 9 por ciento. El aspecto negativo de los subsidios es que los realizadores europeos producen muchas películas que jamás llegan al público. No es posible proteger la diversidad cultural subsidiando películas que nadie quiere ver.

Algunos países han adoptado medidas políticas para reducir este problema. En Australia, por ejemplo, los proyectos cinematográficos tienen que demostrar una "conexión con el mercado" para recibir subsidios de la Corporación de Financiación Cinematográfica de ese país. Esto significa, en esencia, que la película ha de contar previamente con un distribuidor. Otra opción consiste en subsidiar la infraestructura de la industria nacional de televisión y cinematografía —por ejemplo, las instalaciones de producción y de formación profesional— en lugar de los proyectos individuales. Australia acaba de adoptar este método, construyendo un nuevo estudio cinematográfico en Melbourne. Esta estrategia crea asimismo recursos que atraen a los estudios estadounidenses que quieren producir películas en otros países en busca de menores costes laborales. Las películas americanas dan trabajo a los actores y técnicos australianos, y gracias a ello emprenden también proyectos locales. El inconveniente de tal sistema es que los realizadores locales se ven desplazados de las instalaciones que se orientan al mercado estadounidense y cobran altos precios; no pueden tampoco contratar a los más competentes de sus compatriotas.

Tal vez sea llegado el momento de considerar nuevos modos de subsidiar películas y programas de televisión. Dado que la industria del espectáculo es de por sí arriesgada, pudieran ser de utilidad nuevos instrumentos financieros tendentes a neutralizar los riesgos. Por ejemplo, un país europeo o asiático podría crear un mercado secundario para inversiones en cinematografía o televisión y una agencia cuya función recordase a la de un comprador de préstamos en el mercado secundario de hipotecas. Como es obvio, los proyectos de cine o televisión son mucho más inciertos que los inmobiliarios; la analogía es engañosa. Un mercado secundario para la industria del espectáculo se parecería más, tal vez, al mercado de reaseguros de la Lloyd's londinense o, la verdad sea dicha, al mercado secundario de bonos basura. Un mecanismo tal podría servir de refuerzo a compañías de espectáculos faltas de los abundosos recursos económicos de los estudios de Hollywood.

Además, los gobiernos de los países pequeños podrían concentrar sus subsidios en las técnicas nuevas que están dando aliento a las películas y programas de pequeño presupuesto: la producción, posproducción y distribución digitales. Esta estrategia podría tener un efecto secundario benéfico, pues las personas formadas en las técnicas de vídeo digital también aplicarían sus saberes a la creación de juegos de ordenador y programas multimedia.

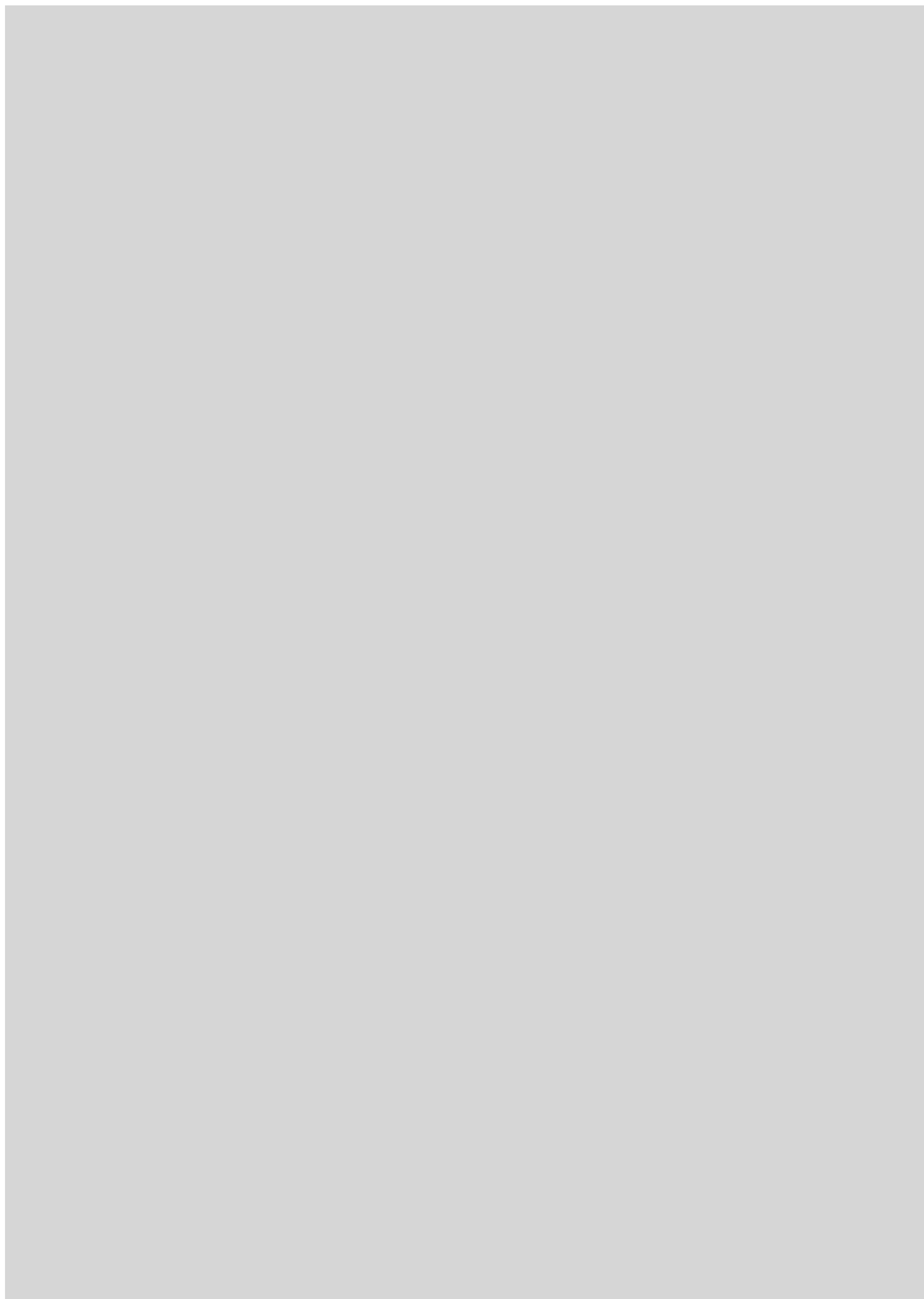
No obstante, las ayudas gubernamentales a la cinematografía y la televisión no tienen por qué justificarse sólo en términos económicos. Si bien es cierto que la industria del espectáculo proporciona empleos muy remunerados y no es de las más dañinas para el medio ambiente, seguiría siendo valiosa aunque no fuera tan lucrativa ni tan poco contaminante. La cultura, después de todo, es recompensa de sí misma.

Bibliografía complementaria

CULTURAL IMPERIALISM: A CRITICAL INTRODUCTION. John Tomlinson. Johns Hopkins University Press, 1991.

THE PRODUCTION OF CULTURE IN THE POSTIMPERIALIST ERA: THE WORLD VERSUS HOLLYWOOD? Harvey B. Feigenbaum en *Postimperialism and World Politics*. Compilación de David G. Becker y Richard L. Sklar. Praeger Publishers, 1999.

GLOBALIZATION AND CULTURAL DIPLOMACY. Harvey B. Feigenbaum. Center for Arts and Culture, 2001.



REGENERACION OSEA

Clifford J. Rosen



1. NUEVOS TRATAMIENTOS y fármacos preventivos permiten paliar o evitar las consecuencias negativas de la osteoporosis en mujeres y varones.

La degeneración del hueso por osteoporosis comporta alteraciones del movimiento. Gracias al conocimiento adquirido en los últimos años sobre la osteogénesis, podemos, sin embargo, acometer una mejor prevención y seguir nuevas opciones terapéuticas

A finales del año pasado acudió, por primera vez, a mi consulta Maxine LaLiberte, de 72 años. Entró cojeando. Me dijo que siempre había sido una mujer muy activa, con frecuencia se ocupaba del cuidado de sus nueve nietos y hasta hacía poco proyectaba recorrer el país en una caravana con su marido. Hasta que se le presentó el dolor insufrible entre los omóplatos, que le impedía el movimiento y le hacía sentirse vieja.

Esos síntomas me resultaban familiares en personas de la edad de mi paciente. Antes de haberla explorado estaba casi seguro de la fractura de una o varias vértebras, subsecuente a un proceso de osteoporosis. Se caracteriza esta alteración por una pérdida ósea tan grave, que pueden producirse fracturas espontáneamente o como resultado de golpes ligeros.

La osteoporosis afecta a unos 10 millones de personas, sólo en los Estados Unidos. La padecen, sobre todo, las mujeres después de la menopausia. Pasado ese umbral, la mitad de las mujeres suelen sufrir alguna fractura relacionada con la osteoporosis. Por fortuna, las perspectivas de la gente con osteoporosis nunca habían sido mejores. Disponemos ahora de fármacos que pueden regenerar el tejido óseo perdido y reducir bastante el riesgo de fracturas. Añádase a ello los avances registrados en la biología molecular y celular de la osteoporosis, que abren nuevas posibilidades de tratamientos más eficaces.

Diez años atrás, las opciones terapéuticas de la osteoporosis consistían todavía fundamentalmente en suplementos de calcio, analgésicos y, para las mujeres menopáusicas, terapias de estrógenos de sustitución, remedios útiles, aunque imperfectos. La terapia sustitutiva, por ejemplo, aumenta el riesgo de ataque cardíaco, apoplejía, cáncer de mama y trombosis. Hoy, por el contrario, se dispone de varios fármacos que reducen la probabilidad de nuevas fracturas hasta en un 70 por ciento en el primer año de tratamiento.

De manera semejante hemos asistido a progresos impresionantes en el diagnóstico. Antes, la fractura era el primer síntoma de una osteoporosis subyacente. Ahora contamos con una herramienta poderosa, la absorciometría de rayos X de energía dual (DEXA), para medir la densidad mineral de los huesos en zonas sensibles a las fracturas. Esta técnica permite diagnosticar una osteoporosis en una fase temprana, cuando se está a tiempo de iniciar un tratamiento con fármacos que pueden evitar las fracturas. Con la aplicación de DEXA, como instrumento de barrido, podemos predecir la probabilidad de fracturas en cualquier zona ósea.

La investigación ha arrojado luz sobre el papel de la herencia en la osteoporosis. Antaño, se admitía que se trataba de una enfermedad "traumática", en la que el desgaste esquelético, decenio tras decenio, culminaba en fracturas y dolor. Pero los estudios genéticos han revelado que los genes influyen sobre la densidad ósea y, por tanto, en el riesgo de fracturas. En ese ámbito, se reconoce que las diferencias genéticas dan cuenta hasta del 70 por ciento de la variabilidad humana de la masa ósea, aunque otros factores, como la dieta y el ejercicio, influyen también. Según parece, en esa inclinación intervienen genes diversos. A medida que se vayan identificando variantes específicas de genes promotores de la osteoporosis, podrá formarse un repertorio de pruebas para detectar el grado de propensión e idear nuevos fármacos capaces de contrarrestar los efectos.

Silenciosa marcha atrás

La exigencia de mejores opciones preventivas y terapéuticas apremia. La osteoporosis, literalmente "huesos porosos", es la causa subyacente de la mayoría de las fracturas de las personas de más de 65 años. Las vértebras, las caderas y las muñecas son, a este respecto, las más sensibles. Los huesos rotos pueden causar un dolor crónico e incapacitante; en el caso de la cadera introducen una serie de acontecimientos que pueden conducir a la muerte.

De los 275.000 estadounidenses, de avanzada edad, que sufren una fractura de cadera cada año, el 20 por ciento mueren de trombosis, infecciones o desnutrición, dentro del año del episodio. Además de los 10 millones de ciudadanos de la Unión con osteoporosis manifiesta, otros 18 millones han tenido pérdida de masa ósea (osteopenia), una afección que eleva el riesgo de que se desarrolle osteoporosis.

Las medicinas introducidas en los últimos 10 años buscan aliviar el sufrimiento de la osteoporosis al obstaculizar el proceso de remodelación. El hueso, de apariencia inerte, es, sin embargo, un tejido vivo, que se destruye y se renueva sin cesar en el curso de la vida entera. Tal regeneración supone una renovación completa del esqueleto cada 10 años, en el curso de la cual se disuelve o reabsorbe hueso viejo y se sus-

MELISSA SZALKOWSKI, GCa *Photo Researchers, Inc.* (*columna dorsal izquierda*), CORBIS (*columna dorsal derecha*)



2. LA COLUMNA VERTEBRAL OSTEOPOROTICA (*izquierda*) muestra el adelgazamiento del hueso y el hundimiento de las vértebras que caracterizan a la enfermedad. Compárense con las vértebras de una columna vertebral normal (*derecha*), densas y uniformes.

ROBERT M. LEVIN *Centro Médico de Boston*

tituye por nuevo. La remodelación repercute en otras funciones fisiológicas, al liberar del hueso calcio requerido por diversos tejidos y la reparación de microfracturas. Pero en la raíz de la osteoporosis se esconde también una regeneración deficiente.

Durante la infancia y la adolescencia, la formación del hueso prosigue a un ritmo más rápido que la reabsorción. En virtud de ello, la densidad del hueso aumenta hasta que el adulto joven alcanza su masa ósea máxima, alrededor de los 18 años. La densidad permanece constante durante el período de la juventud y primera madurez, pues la formación del hueso y la reabsorción proceden al mismo ritmo. Pero alrededor de los 40 años comienza una alteración del hueso relacionada con la edad; la reabsorción lleva un ritmo más rápido que la formación del hueso. Por varias razones, sin embargo, el riesgo de osteoporosis es mucho mayor en las mujeres, entre las que encontramos hasta el 80 por ciento de los casos.

En promedio, el máximo de masa ósea alcanzado por la mujer suele ser un 5 por ciento menor que el típico del varón. Eso significa que las mujeres arrancan con una densidad inferior en la reserva ósea cuando comienza la pérdida ósea asociada a la edad. Además, pierden estrógeno (un importante protector del hueso) en la menopausia. Debido a ello, la merma ósea en las mujeres puede aumentar de manera aguda a los cuatro años tras el descenso de estrógeno en la menopausia.

Osteoblastos y osteoclastos

De la remodelación ósea se encargan dos tipos de células: los osteoblastos, formadores del hueso, y los osteoclastos, de gran tamaño, que se ocupan de la reabsorción del hueso. Ambos tipos celulares convergen en los tres o cuatro millones de zonas de remodelación: las unidades multicelulares básicas (UMB) de la remodelación ósea, distribuidas por todo el esqueleto. Se trata de un proceso secuencial estereotipado: una fase de reabsorción ósea (de dos a tres semanas), seguida de una fase más lenta (de dos a tres meses) de formación ósea.

Comienza la reabsorción cuando los osteoclastos se adhieren a una sección microscópica de la superficie ósea y liberan sustancias que degradan las partes estructurales del hueso: calcio, otros minerales y colágeno. Esta actividad de degradación produce una indentación en el hueso, el pozo de reabsorción. Desaparecen luego los osteoclastos, por una presumible muerte celular programada (apoptosis).

Se inicia la fase de formación ósea cuando los osteoblastos —quizás atraídos por factores de crecimiento liberados durante la reabsorción ósea— convergen en el pozo de reabsorción y lo rellenan con hueso nuevo, al sintetizar y segregar colágeno y otras proteínas óseas. Calcio, fósforo y otros minerales cristalizan entonces alrededor de la matriz de colágeno para formar hidroxiapatito, la parte mineralizada dura del hueso que constituye hasta un 90 por ciento de su masa.

Hasta finales del año pasado, todos los fármacos aprobados para el tratamiento de la osteoporosis entraban en la consideración de antirreabsortivos, porque enlentecían la reabsorción; no buscaban promover la formación, aunque cualquier sustancia que afecte un proceso afecta también al otro en cierto grado. Los fármacos pertenecientes a un tipo de antirreabsortivos en particular —los bisfosfonatos— han transformado el tratamiento de la osteoporosis. Constituyen ahora la primera opción para varones y mujeres con osteoporosis. Estos agentes orales enlentecen la remodelación ósea al fijarse a la parte mineral del hueso, donde se asientan en espera de los osteoclastos para unirse

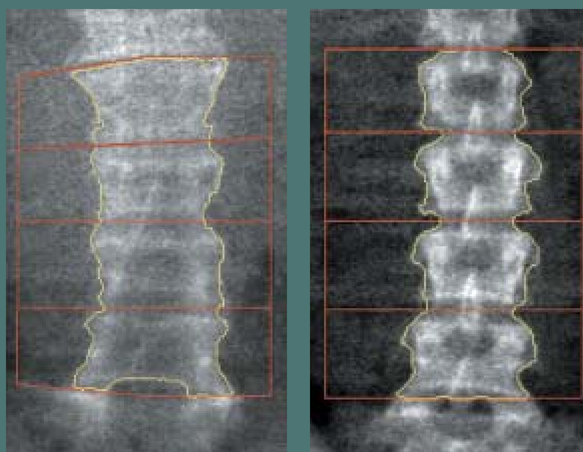
Resumen/*Osteoporosis*

- Los huesos se hallan, durante el curso de la vida, en permanente disolución y reconstitución. La osteoporosis aparece cuando las células que degradan el hueso, los osteoclastos, desarrollan una actividad mayor que las células constructoras, los osteoblastos.
- Los nuevos tratamientos de la osteoporosis se basan en el bloqueo de la actividad de los osteoclastos o en su destrucción.

a la superficie del hueso. Alcanzado ese objetivo, los bisfosfonatos se difunden por el interior de los osteoclastos e inducen la autodestrucción de estas células.

Los ensayos clínicos, realizados a gran escala y de forma aleatoria, han demostrado sin ambages que los bisfosfonatos más potentes —alendronato (Fosamax) y risedronato (Actonel)— no sólo evitan la pérdida ulterior del hueso, sino que, además, aumentan, en tres años, la densidad del hueso en la mayoría de los pacientes hasta en un 5 y 10 por ciento. Esa reconstrucción del hueso puede parecer modesta, pero es suficiente para rebajar el riesgo de fracturas de la columna vertebral, cadera y muñeca hasta en un 50 por ciento en tres años, con una reducción evidente más significativa en el primer año de tratamiento. Los bisfosfonatos hay que tomarlos sólo una vez a la semana, y parecen inocuos: aparte de ardor precordial, los efectos secundarios son raros. Puesto que se trata de fármacos que se vienen indicando desde hace sólo diez años, ignoramos su repercusión más allá de ese intervalo.

PRUEBAS PREVENTIVAS



IMAGENES DE ESCANER DE COLUMNA con la técnica de absorciometría de rayos X de energía dual (DEXA) para diagnosticar la osteoporosis. El hueso de la columna lumbar de un paciente con osteoporosis (*izquierda*) es mucho menos denso que el de la columna de un individuo normal (*derecha*). Las vértebras han comenzado a hundirse, alterando la alineación de la columna (*líneas rojas*).

¿Debería hacerse un chequeo a las mujeres mayores para descubrir si corren riesgo de fracturas por osteoporosis? Por lo menos, contamos con las herramientas para determinar la densidad mineral del hueso.

Los estudios muestran que las medidas de densidad —de la cadera o columna, por ejemplo— pueden predecir, con bastante seguridad, cuánto riesgo corre una persona de sufrir una fractura en esas zonas. El patrón para medir la densidad ósea nos lo ofrece la absorciometría de rayos X de energía dual (DEXA), técnica que, si bien emplea rayos X, conlleva una escasa exposición a la radiación. La DEXA diagnostica una osteoporosis cuando encuentra que la medida de la densidad es mucho más baja que la media de la columna, cadera o muñeca de mujeres jóvenes sanas (2,5 o más desviaciones estándar de la media).

Con esta técnica la mujer no sólo sabe si padece osteoporosis, sino que conoce también qué riesgo tiene de sufrir una fractura en esas regiones en los años siguientes: un dato muy útil, porque los nuevos fármacos pueden regenerar la densidad ósea y prevenir fracturas antes de que ocurran. Sin embargo, los críticos de ese chequeo señalan que la densidad mineral es sólo uno entre muchos otros factores (incluidos el ejercicio físico, nutrición, genética y calidad del tejido óseo) que afectan al riesgo de fractura de una mujer. Además, objetan, las mujeres preocupadas por esos valores bajos podrían recusar los fármacos, como el estrógeno, ante posibles efectos secundarios.

La autoridad sanitaria norteamericana apoya a quienes defienden el chequeo y ha recomendado que todas las mujeres de 65 años o más midan su densidad ósea al menos una vez para determinar el riesgo de fractura. El riesgo de padecer osteoporosis aumenta de manera constante y substancial con la edad. Si se comparan con mujeres entre 50 y 54 años, las de 65 a 69 presentan una probabilidad 5,9 veces más elevadas de padecer osteoporosis y las de 75 a 79 14,3 veces.

FAYE LIQUE *Centro Maine para la Investigación y Educación de Osteoporosis*

Nuevos objetivos para los fármacos

En busca de fármacos más eficaces para combatir la osteoporosis, la investigación polariza su atención en el mecanismo regulador de la remodelación ósea, para poder manipular estos controles y estimular, por ende, la osteogénesis. En particular, se han registrado avances notables en la regulación de la formación y maduración de los osteoclastos, las células que disuelven el hueso.

Osteoblastos y osteoclastos se originan de la diferenciación de células precursoras de la médula ósea (donde se encuentran también las células hemopoyéticas). Las células del estroma maduran para dar osteoblastos; los macrófagos (un tipo de leucocito) maduran y originan osteoclastos. Se sabe ya que las células del estroma y su progenie, los osteoblastos, controlan la producción de los osteoclastos que degradan el hueso; lo consiguen mediante la secreción de diferentes moléculas de señalización: dos que promueven el desarrollo del osteoclasto y una tercera que lo suprime.

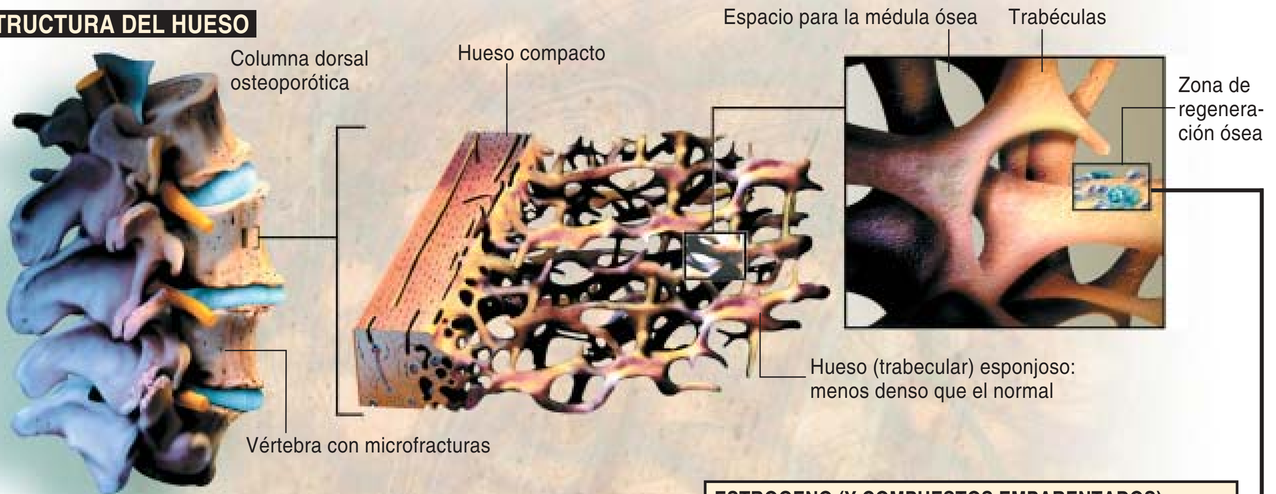
En un primer momento, los osteoblastos segregan el factor estimulante de colonias de macrófagos; esta molécula de señalización induce la multiplicación de macrófagos. Una segunda molécula, RANKL, segregada por los osteoblastos, se une a un receptor diferente en los macrófagos e induce, en estas células, el proceso que las convierta en osteoclastos. Por su parte, el tercer producto de los osteoblastos, la osteoprotegerina, bloquea la formación de osteoclastos; con tal fin actúa de receptor señuelo: traba a RANK y evita que entre en contacto con su receptor situado en los macrófagos.

En teoría, cualquier agente que se oponga a la formación de los osteoclastos —y, por tanto, a la reabsorción del hueso— debería potenciar la densidad ósea. Hay en marcha una investigación de corte molecular: la administración de osteoprotegerina. En los ensayos en humanos, inyecciones de esta molécula han decelerado el ritmo de reabsorción ósea, por lo menos en un 60 por ciento. Se han identificado también una decena de señales químicas implicadas en la coordinación de la formación y reabsorción ósea: entre ellas, la hormona paratiroidea, estrógeno e IGF-1 (factor-1 de crecimiento semejante a la insulina). Del estudio de estas sustancias han salido nuevas propuestas para prevenir y curar la osteoporosis.

OSTEOPOROSIS Y OBJETIVOS DEL TRATAMIENTO

EL ORGANISMO RENUEVA sin cesar los huesos a lo largo de la vida. Para ello se vale de dos tipos de células: los osteoclastos, que destruyen hueso viejo, y los osteoblastos, que generan hueso nuevo. La osteoporosis aparece cuando se rompe el equilibrio entre la actividad de osteoclastos y osteoblastos, inclinando la balanza a favor de la destrucción del hueso. Hay ya diversos fármacos en el mercado o en desarrollo (*recuadros dorados*) para el tratamiento de la osteoporosis mediante un descenso de la acción de los osteoclastos o un aumento de la intervención de los osteoblastos.

ESTRUCTURA DEL HUESO

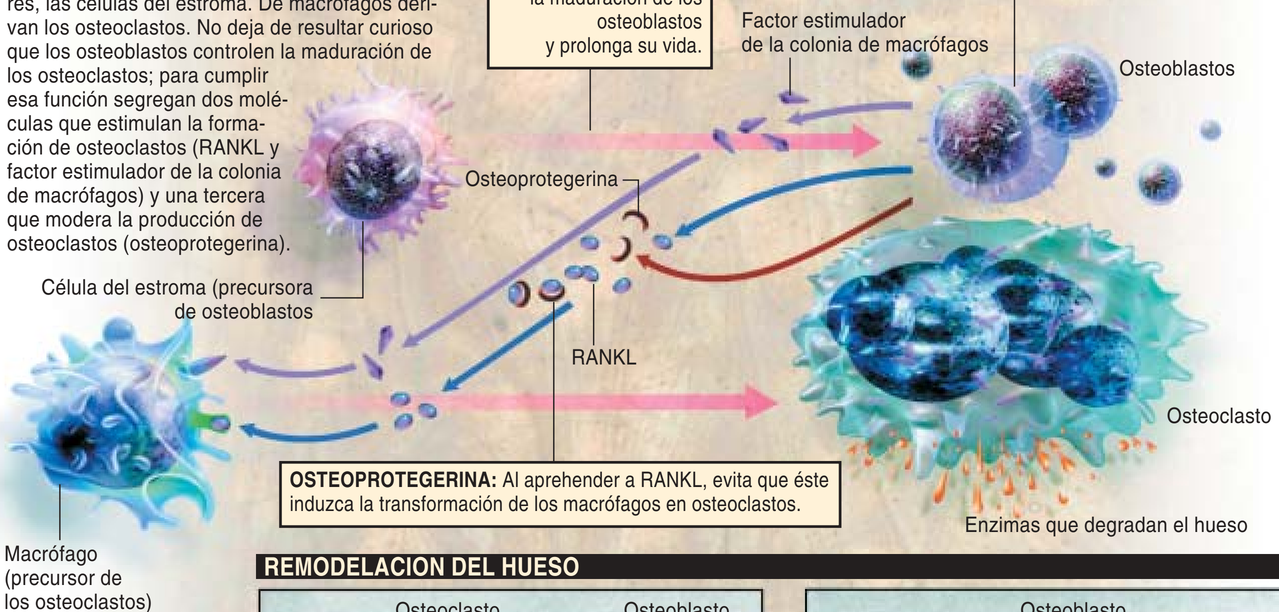


FORMACION DE OSTEOCLASTOS Y OSTEOBLASTOS

LOS OSTEOBLASTOS surgen de unos precursores, las células del estroma. De macrófagos derivan los osteoclastos. No deja de resultar curioso que los osteoblastos controlen la maduración de los osteoclastos; para cumplir esa función segregan dos moléculas que estimulan la formación de osteoclastos (RANKL y factor estimulador de la colonia de macrófagos) y una tercera que modera la producción de osteoclastos (osteoprotegerina).

HORMONA PARATIROIDEA: Administrada de manera intermitente promueve la maduración de los osteoblastos y prolonga su vida.

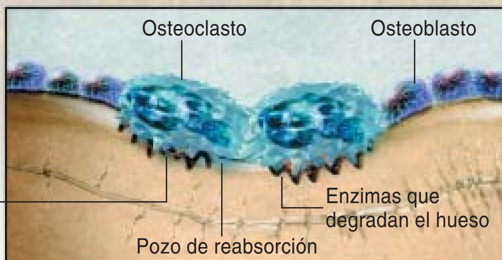
ESTROGENO (Y COMPUESTOS EMPARENTADOS): El estrógeno, moduladores SERM y activadores ANGEL incitan a los osteoblastos a que produzcan más osteoprotegerina. Prolongan también la vida de los osteoblastos y destruyen a los osteoclastos.



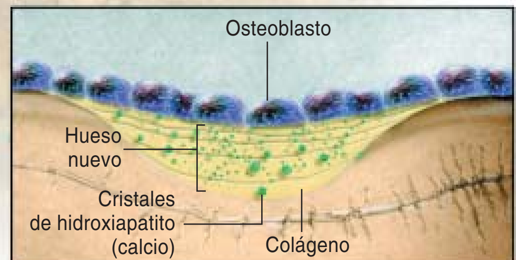
OSTEOPROTEGERINA: Al aprehender a RANKL, evita que éste induzca la transformación de los macrófagos en osteoclastos.

REMODELACION DEL HUESO

BISFOSFONATOS: Inducen la autodestrucción de los osteoclastos.



REABSORCION: Los osteoclastos invaden la superficie del hueso y segregan enzimas que disuelven el hueso; éstas excavan cavidades (hoyos de reabsorción) para liberar calcio.



FORMACION: Los osteoblastos rellenan las cavidades al formar hueso nuevo. Adviene la osteoporosis cuando los osteoclastos hacen muescas demasiado profundas o cuando los osteoblastos son incapaces de rellenarlas con hueso nuevo.

KEITH KASNOT

El estrógeno del torrente circulatorio ejerce varios efectos en el organismo al asociarse con receptores estrogénicos sitos en el útero, mama, colon, músculo y hueso. Desde hace 50 años se sabía que el estrógeno contribuye a mantener la densidad ósea, pero desconocíamos los mecanismos moleculares implicados. Pero ya está demostrado que, entre las funciones del estrógeno, debe citarse la de interponerse en la creación de osteoclastos.

Acotando más, el estrógeno se une a los osteoblastos en el hueso. Les induce a intensificar la producción y liberación de osteoprotegerina y a detener la síntesis de RANKL: una combinación de señales que suprime la formación de osteoclastos, manteniendo controlada la pérdida de hueso. La reducción de estrógeno que acompaña a la menopausia contribuye así a una pérdida de hueso; lo hace, en buena medida, mediante la eliminación de un freno importante de la formación y actividad de los osteoclastos. Además, el estrógeno parece prolongar la vida de los osteoblastos, al mismo tiempo que promueve el suicidio de los osteoclastos. Por ello, la caída de estrógeno en la menopausia sacude a las mujeres con un triple azote: los osteoblastos de vida breve deben pugnar con más osteoclastos, que a la vez viven mayor tiempo.

Hasta hace poco, los médicos solían recomendar a sus pacientes menopáusicas una terapia hormonal de sustitución (por lo común, estrógeno combinado con progestina, una forma de progesterona), no sólo para protegerlas frente a la osteoporosis, sino también para prevenir cardiopatías, demencias y otros achaques asociados a la edad, en los que el estrógeno se consideraba útil. Se creía que los beneficios acarreados por la terapia de sustitución superaban los riesgos potenciales.

De ahí la sorpresa general cuando las autoridades sanitarias norteamericanas determinaron que la terapia hormonal de sustitución causaba cierto incremento de las tasas del cáncer de mama, ataque cardíaco, apoplejía y trombosis; confirmaron también que los riesgos de la terapia de substitución superaban los modestos beneficios, que incluyen un moderado descenso del riesgo de fracturas de cadera y cáncer de colon. Al poco, tras la criba de tales resultados y otros similares, la Agencia Estadounidense de Medicina Preventiva recomendó el abandono de la terapia combinada de estrógeno y progestina en la prevención de enfermedades cardiovasculares y otras afecciones crónicas, como la osteoporosis, en las mujeres posmenopáusicas.

De momento, las mejores alternativas del estrógeno para mantener la salud ósea nos las ofrecen los bisfosfonatos. En un meta-análisis, que nuestro grupo ha completado recientemente, se ha visto que, si se combinan los datos de muchos estudios, los bisfosfonatos resultan ser ligeramente mejores que la terapia con estrógeno para aumentar la densidad mineral y prevenir fracturas.

Los moduladores selectivos del receptor de estrógeno (SERM) pueden constituir fármacos útiles también para el tratamiento prolongado de mujeres temerosas de sufrir un cáncer de mama. Estos fármacos SERM ejercen la misma acción que el estrógeno en ciertos tejidos (óseo, por ejemplo); en otros (mamario), sin embargo, bloquean los efectos del estrógeno. Hasta ahora, el único fármaco SERM aprobado para el tratamiento y prevención de la osteoporosis es el raloxifeno (Evista), aunque hay más en fase de ensayo. El raloxifeno no posee la eficacia del estrógeno a la hora de incrementar la densidad mineral y prevenir fracturas; puede, además, provocar sofocos. Sin embargo, algunos estudios realizados con mujeres sometidas a un tratamiento contra la osteoporosis han demostrado que el raloxifeno reducía el riesgo de cáncer de mama.

El control de los controladores

Una respuesta todavía más atractiva podría hallarse en el horizonte. De aquí a unos años comenzarán los ensayos de estrógenos sintéticos en humanos, con todos los beneficios para el hueso y sin ninguno de los riesgos: estarán recomendados no sólo para la mujer sino también para el varón. Esa línea de trabajo se inició al hilo de una hipótesis radical propuesta hace unos años por Stavros C. Manolagas, de la facultad de medicina de la Universidad de Arkansas.

Manolagas avanzó que el estrógeno operaba sobre las células de dos maneras distintas: por vía genotrópica y por vía no genotrópica. La primera procede a través del mecanismo, bien establecido, que sigue el estrógeno en su acción sobre *todos* sus tejidos diana de la mujer, reproductores y no reproductores. Una vez que el estrógeno cruza la membrana externa de la célula y atraviesa el citoplasma, penetra en el núcleo y allí se une a su receptor. El dúo estrógeno/receptor (junto con los coactivadores, otras proteínas nucleares) interacciona directamente con secuencias específicas de ADN y activa ciertos genes que dan lugar a las proteínas necesarias para la fisiología celular.

Pero esta vía "genotrópica" (llamada así por el contacto directo del estrógeno con los genes) no puede explicar los múltiples efectos del estrógeno sobre las células. Por eso Manolagas presentó la hipótesis de que el estrógeno actúa también por un mecanismo diferente, que afecta al hueso y a otros tejidos no relacionados con la reproducción, lo mismo en el hombre que en la mujer, y no ejerce efecto alguno sobre los tejidos de la reproducción. En ese cuadro, el estrógeno se sigue uniendo a sus receptores en las células, aunque entonces la hormona y su receptor promueven cambios celulares al actuar sobre quinasas, enzimas que residen fuera del núcleo, en el citoplasma. (En el caso del tejido óseo, estas quinasas se hallan en el citoplasma de osteoblastos y osteoclastos.) Las quinasas, activadas, parten hacia el núcleo, donde contribuyen a regular la expresión de genes.

Manolagas y sus colaboradores sintetizaron una hormona semejante al estrógeno. Le impusieron el nom-

El autor

CLIFFORD J. ROSEN, director del Centro de Osteoporosis de Maine en Bangor, preside la Sociedad Norteamericana de Investigaciones Oseas.

LA CULPA ES DE LA EVOLUCION

HACE MILLONES DE AÑOS nuestros antepasados abandonaron las aguas oceánicas y siguieron su evolución en tierra firme. El tránsito les obligó a hacer frente a un grave problema: ¿cómo satisfacer los requerimientos de calcio, que hasta entonces absorbían del mar?

El hombre y otros mamíferos consiguieron en el curso de la evolución una solución ingeniosa: disponer del propio esqueleto —donde reside el 99 por ciento del calcio corporal— como una suerte de reservorio de calcio. En un proceso conocido como homeostasis del calcio, el mineral se deposita en el esqueleto o se extrae del mismo, de forma que los niveles en sangre se mantengan dentro de unos márgenes estrechos para la conducción nerviosa, coagulación sanguínea, contracción muscular y otras funciones fisiológicas vitales. Por desgracia, este proceso está en la raíz de la osteoporosis, porque exige el sacrificio del esqueleto para mantener los niveles sanguíneos de calcio adecuados.

En el sistema regulador de la homeostasis del calcio en el corazón se hallan implicados la hormona paratiroidea (PTH), la vitamina D y el calcio recabado de la ingesta. Cuando la glándula paratiroides (situada junto a la glándula tiroides) detecta una caída en los niveles de calcio circulante en el torrente sanguíneo, segrega PTH. Opera esta hormona de formas varias para promover la subida de los niveles de calcio en sangre: constituye un poderoso impulsor de la osteoporosis, pues induce la acción de los osteoclastos (células degradadoras del hueso), que disuelven entonces el hueso y liberan calcio en la circulación; compete también a la hormona paratiroidea estimular a los riñones, que devuelven el calcio a la sangre en vez de excretarlo; también, la hormona provoca que el intestino delgado absorba con mayor eficacia el calcio encerrado en el alimento, labor que la PTH acomete por vía indirecta al aumentar la producción orgánica de vitamina D.

Un 90 por ciento de la vitamina D de la persona se sintetiza en la piel, aprovechando la energía procedente de la radiación solar ultravioleta. (Extraemos también vitamina D del pescado graso y de productos lácteos reforzados con dicha vitamina.) En una reacción química que se inicia en la piel, sigue por el hígado y alcanza los riñones, la hormona paratiroidea insta la transformación de la vitamina D3 (precursor de la vitamina D sintetizado cuando los rayos ultravioleta inciden en la epidermis) en su forma más activa de vitamina D. Actúa ésta directamente en el intestino delgado; facilita allí su absorción del calcio de la dieta; con ello, se dispone de mayor cantidad de mineral para el desenvolvimiento de funciones fisiológicas y para la regeneración de los huesos.



GETTY IMAGES (*vaso de leche*); JONELLE WEAVER *Getty Images* (*queso*); FRANÇOISE SAUZE *Photo Researchers, Inc.* (*pastillas de calcio*); INC. JANEART *Getty Images* (*mujer paseando*)

Una disminución de vitamina D recorta la cantidad de calcio que se absorbe del alimento y ocasiona el descenso de los niveles de calcio sanguíneos, situación que excita a la glándula paratiroidea para que eleve los niveles de vitamina D activa. Las personas que suelen adolecer de niveles bajos de la vitamina tienden a tener una concentración crónicamente alta de hormona paratirodea, condición que recibe el nombre de hiperparatiroidismo secundario. Los niveles elevados de PTH consiguen mantener los niveles de vitamina D y calcio cercanos a los normales, pero aceleran también la reabsorción del hueso que desemboca en la osteoporosis.

De acuerdo con algunos estudios recientes, los niveles bajos de vitamina D son habituales, sobre todo, entre los moradores de latitudes septentrionales, donde la exposición al sol es limitada. En trabajos realizados con mujeres mayores, los suplementos de vitamina D han permitido restaurar los niveles normales de esta vitamina y así prevenir la pérdida de hueso. Yo recomiendo que las mujeres mayores de 65 años que viven en las latitudes septentrionales tomen 400 unidades internacionales (UI) de vitamina D cada día, más otras 400 UI adicionales durante los meses de invierno, cuando las densidades óseas tienden a descender y los casos de fractura aumentan.

Importa, asimismo, una ingestión de cantidades suficientes de calcio (de 1000 a 1500 miligramos al día). El momento ideal para ingerir una cantidad adecuada de calcio no es la edad adulta, sino la infancia y la adolescencia, cuando se alcanza el máximo de la masa ósea. Y lo mismo vale para el ejercicio, que a menudo se recomienda para mantener la salud de los huesos viejos. Cuando se combina con una adecuada ingesta de calcio, el ejercicio —en especial la carrera moderada y otras formas de ejercicio con sobrecarga— contribuye a hacer más lenta la pérdida de hueso; puede incluso aumentar la densidad del hueso en la gente mayor. Ello no obsta para que el ejercicio —al igual que la ingesta de calcio— ejerza sus mejores efectos durante la juventud. Cuanto mayor sea la masa ósea que uno adquiere cuando se es un adulto joven, menor será el riesgo de que desarrolle una osteoporosis en edad avanzada.

ENTRE LOS COMPONENTES ESENCIALES para el desarrollo del hueso están los alimentos ricos en calcio y vitamina D —como la leche y el queso enriquecidos— o suplementos vitamínicos y minerales. Los ejercicios con sobrecarga, paseos y carreras moderadas ayudan también a conservar los huesos fuertes y saludables.

bre de estren. De acuerdo con su diseño debe operar exclusivamente a través de la vía no genotrópica. En octubre del año 2002 publicaron en *Science* los resultados de sus trabajos con ratones, donde comparaban estren y estrógeno. El estren superaba la eficacia del estrógeno en la regeneración del hueso en la hembra del ratón, cuyos ovarios se habían extirpado para simular la menopausia. Era reseñable que el estren no originaba un aumento de peso del útero, confirmando así la ausencia de efecto de este fármaco sobre el tejido reproductor. Se observaron también resultados semejantes en ratones macho: el estren no desmerecía de la testosterona en cuanto a capacidad de regeneración del hueso perdido en los ratones en que se habían extirpado los testículos; a diferencia de la testosterona, no repercutió sobre

el peso de las vesículas seminales en los ratones macho.

Estos hallazgos indican que el estren podría ser el primero de una clase nueva de fármacos contra la osteoporosis: los activadores de la señal, no genómica, similar a la estrogénica, o ANGELS (su acrónimo de la expresión inglesa). Estos agentes podrían actuar mejor que el estrógeno en la regeneración del hueso, sin causar los efectos indeseados sobre el tejido reproductor (cáncer de útero o de mama).

Hormona paratiroidea

Se insiste en que el estrógeno protege contra la pérdida de hueso al limitar el desarrollo de los osteoclastos. No debe, empero, olvidarse que la hormona paratiroidea (PTH) puede considerarse el motor de la osteoporosis. Promueve la acción de los osteoclastos. La PTH dispara indirectamente la formación de osteoclastos, al unirse a los osteoblastos e incitarles a que intensifiquen la síntesis y liberación de RANKL y la producción de osteoprotegerina; dicho de otro modo, el camino opuesto al seguido por el estrógeno en la regulación de la producción de RANKL y osteoprotegerina para bloquear la formación de osteoclastos y conservar el hueso.

Paradójicamente, sin embargo, se ha aprobado la PTH, notorio reabsortivo, como el primer agente regenerador de hueso y opuesto a los antirreabsortivos. Algunos datos sugieren que podría ser el mejor de todos los tratamientos de la osteoporosis.

Aunque la PTH endógena promueve la pérdida de hueso cuando persiste largo tiempo en concentraciones elevadas, las inyecciones intermitentes desencadenan una respuesta harto distinta. El primer atisbo de que la hormona paratiroidea pudiera intervenir en la regeneración ósea apareció en 1928, cuando se observó que la inyección de la misma en perros aumentaba la densidad ósea. Un resultado que permaneció olvidado hasta el decenio de los setenta. Entonces, sendos equipos del Hospital General de Massachusetts y de la Universidad de Cambridge comenzaron, por caminos independientes, a investigar qué ocurría con la liberación de PTH, al principio natural y luego en su forma recombinante.

En el transcurso del último cuarto de siglo, los ensayos en humanos han puesto de relieve que la administración intermitente de hormona paratiroidea presenta una capacidad notable para aumentar la densidad ósea (en vertebrados, sobre todo), reforzar la integridad estructural del hueso y evitar fracturas, en varones o en mujeres posmenopáusicas. En particular, la inyección diaria de PTH comporta, al año, un aumento de densidad ósea cifrado en el 8 o 10 por ciento; súmese a ello que el peligro de fracturas cae en un impresionante 60 por ciento.

¿Por qué la hormona paratiroidea endógena provoca una merma de masa ósea y, por el contrario, ejercen un efecto regenerador los pulsos de inyección? Según parece, las dosis intermitentes guían la maduración de los precursores en osteoblastos, al tiempo que evitan la muerte de los osteoblastos ya existentes; de ese proceso resulta un número mucho mayor de osteoblastos regeneradores del hueso que funcionan durante períodos más dilatados.

La terapia de administración intermitente de hormona paratiroidea activa el IGF-1, ya mencionado. El factor-1 de crecimiento parecido a la insulina, que estimula el desarrollo y diferenciación de las células del estroma en osteoblastos formadores del hueso, circula a elevadas concentraciones por el torrente sanguíneo. Las personas adultas con buena salud revelan, entre sí, unas diferencias en niveles séricos de IGF harto manifiestas. Diferencias que repercuten en la densidad ósea. Se ha observado, en determinadas mujeres, que, a mayor concentración de IGF-1, mayor densidad ósea en columna, cadera y muñeca.

Aunque la dieta ejerce alguna influencia sobre el IGF-1 (la desnutrición provoca caídas notables), los niveles de IGF-1 se hallan en gran parte determinados por la herencia. En este último decenio mi laboratorio de Ben Harbor ha venido estudiando la regulación genética de IGF-1. Trabajamos con dos estirpes de ratón que presentan diferencias muy nítidas en densidad mineral del hueso. Hemos averiguado que el 60 por ciento o más del IGF-1 viene condicionado por la genética, un hallazgo de especial valor si advertimos que los nuevos datos sugieren que los niveles “normales altos” de IGF-1, que protegen contra la osteoporosis, guardan también correlación con un aumento del riesgo de cáncer de mama, cáncer de próstata y, quizá, cáncer de colon. En el futuro, la medición de los niveles de IGF-1 en humanos podría ser un indicador útil de riesgo; los niveles elevados revelarían un riesgo bajo para la osteoporosis y un riesgo elevado para ciertos tipos de cáncer.

A la postre, el escáner con DEXA de la columna de Maxine confirmó mis sospechas. Había sufrido una fractura reciente de la octava vértebra torácica (T8), cerca de los omóplatos; su densidad mineral ósea estaba más de 2,5 desviaciones estándar por debajo de la que es normal en una mujer de 35 años. Cualquiera de los dos datos bastaba para establecer el diagnóstico de osteoporosis, aunque el pronóstico era bueno. Le dije que el dolor de la espalda disminuiría en las semanas siguientes. Y le receté un fármaco de bisfosfonato que restauraría su densidad ósea entre un 5 y 10 por ciento, amén de reducir en un 70 por ciento la probabilidad de que padeciera una fractura en un año. La noticia le alegró. Con más nietos en el camino sus responsabilidades para cuidarlos iban a multiplicarse.

Bibliografía complementaria

OSTEOPOROSIS: DIAGNOSTIC AND THERAPEUTIC PRINCIPLES. Dirigido por Clifford J. Rosen. Humana Press, Totowa, N.J., 1996.

OSTEOPOROSIS. Segunda edición. Juliet E. Compston y Clifford J. Rosen. Health Press, Oxford, 1999.

BONE REMODELING AND REPAIR. Sección especial de *Science*, vol. 289, págs 1497-1514; 1 de septiembre de 2000.

La gastronomía medieval

En la Edad Media, la cocina es un arte. Las especias llegadas de Oriente acompañan tanto a potajes como a platos de aves y a postres. La dietética se convierte en una preocupación para los médicos, que consideran a los alimentos no sólo como un medio para tratar ciertas enfermedades, sino también para prevenirlas

Bruno Laurioux

En un restaurante parisiense se ofrecía, recientemente, "una cocina original que rescata sabrosas recetas de antaño, presentadas como en el siglo XIII". El menú comprendía, entre otros garrafales errores, "carne lardeada hervida, acompañada de lingotes colados" (es decir, con judías, llegadas de América en época moderna) y el "viandier de Taillevent", constituido por la parte central, tierna y gustosa, de la pierna de buey —cuando el buey no se hacía a la parrilla en la cocina francesa medieval—. La guinda del almuerzo era un hipocrás, que, teóricamente, es una bebida de vino aromatizado con especias, pero que aquí se componía de una genovesa (masa de bizcocho ligera, de azúcar y huevos batidos) merengada y de un sirope con ron y chocolate, ¡que son productos o técnicas desconocidas en la Edad Media!

Estas pretendidas recetas "medievales" nos muestran que abundan las ideas falsas sobre la cocina medieval. El peor tópico es, sin lugar a dudas, el que repite que los hombres medievales comían mal, sin discernimiento y a dos carrillos. Esta idea procede de la visión de la Edad Media heredada del Siglo de las Luces: según los contemporáneos de Voltaire, esta época no habría sido más que un amplio período de regresión, a caballo entre la Antigüedad y el Renacimiento. Esta visión tan negativa perdura aún actualmente. Pocos imaginan que los hombres y las mujeres de la Edad Media hubieran podido tener gusto. De acuerdo con este prejuicio común, eran rudos y poco refinados en el ámbito culinario, entre otros defectos que se les atribuían. Nuestros ancestros, siguiendo estos argumentos, no habrían conocido el arte de comer bien, es decir, la gastronomía.

No obstante, a partir del XVIII, cocineros y gastrónomos comienzan a interesarse vivamente por los platos de épocas pasadas. Estos apasionados de la "gastronomía histórica" fueron coleccionando las recetas antiguas y las reinterpretaron de acuerdo con los métodos y los valores de su tiempo. Esta actividad condujo a las "recetas de caballeros", tan numerosas como absurdas, y a interpretaciones erróneas de los usos culinarios medievales. La primera aproximación científica a la alimentación medieval la llevó a cabo, tras la segunda guerra mundial, la escuela historiográfica de los *Annales*, inspirada por Marc Bloch. Estos historiadores se interesaban, ante todo, por los aspectos biológicos (composición de la ración en lípidos o prótidos, por ejemplo), económicos (aprovisionamiento) y sociológicos (influencia del *status* social en la alimentación), pero ninguno de ellos se ocupó de la cocina. Habría que esperar al decenio de 1980 para que, por iniciativa de Jean-Louis Flandrin, profesor de la Universidad de París 8 y director de estudios en la Es-

cuela de Altos Estudios en Ciencias Sociales, se iniciase un estudio realmente histórico sobre la cocina medieval.

La literatura gastronómica medieval

La primera constatación que hicieron los historiadores fue simple: la gastronomía medieval existió, sin ningún género de dudas. ¿Cómo se puede explicar, si no, el gran número de tratados culinarios que nos ha legado la Edad Media? Esta época duró más de 1000 años, desde la caída del Imperio romano de Occidente en el año 476 hasta el descubrimiento de América en 1492. Ahora bien, los documentos al alcance de los historiadores son más bien escasos. Para la Antigüedad, para la Alta Edad Media y hasta el siglo XIII, la única información existente es la proporcionada por los arqueólogos. Los primeros textos que tratan de un modo directo el tema de la cocina están fechados en el siglo XIII. Para el conjunto de los siglos XIII, XIV y XV hay un total de 150 libros de cocina, contenidos en manuscritos procedentes de toda Europa. Hay que añadir numerosos tratados médicos de finales de la Edad Media que tratan de la dietética. Con ellos cabe aproximarse a aquella cocina. Por tanto, los historiadores estudian, sobre todo, la gastronomía de finales de la época medieval; para ese período se dispone de fuentes variadas: libros de co-



B.N.F.

1. LA COMIDA de los aristócratas medievales se anunciaba ceremoniosamente por medio de trompetas. Después de frutas y otros alimentos propios de cada estación del año, se servían potaje, asado y entremeses. El número de platos servidos en cada comida era variable.



B.N.F.

2. SERVIDORES especializados prestaban sus servicios en los banquetes. Aquí, un "*écuyer-tranchant*" (trinchador) corta la carne de un señor al que se entretiene mientras espera.

cina, manuales médicos, cuentas de aprovisionamiento o, incluso, textos religiosos.

Estas fuentes reflejan un momento clave en la historia de la alimentación europea, hacia el final de la Edad Media. Este período innovador, tanto en el plano de los sabores como en el de la presentación de los platos o las normas de cortesía en la mesa, supuso una renovación en la gastronomía. Es a partir de entonces cuando se afirma un gusto occidental, muy diferente del que reinaba entre las elites del mundo musulmán o de la Antigüedad. Era, ante todo, el gusto de las clases privilegiadas: los libros de cocina fueron redactados por cocineros al servicio de los grandes príncipes, tanto laicos como eclesiásticos. Las orientaciones y temas que surgen por entonces se perpetúan hasta el siglo XIX. Se apoyan, a la vez, en una tradición de escritos culinarios bien establecida y en las reflexiones dietéticas transmitidas desde la Antigüedad por varias generaciones de médicos. En este aspecto, la gastronomía medieval se ve a sí misma como un arte y una ciencia por igual. Un estudio minucioso de los textos antiguos indica que, al contrario de lo que a menudo se ha escrito, la cocina aristocrática era refinada, variada e innovadora.

¿Qué herencias culinarias recibió la Edad Media? La época fue el resultado de la simbiosis entre dos modelos: el primero, procedente de la Roma antigua, se basaba en la tríada pan-vino-aceite y, por tanto, se asemejaba a lo que hoy se conoce como "dieta mediterránea". Los "bárbaros" germánicos habrían introducido en Occidente un segundo modelo, carnívoro sobre todo, con carne más de ganado que de caza. La carne, en cambio, era un alimento prohibido a los monjes, cuyas reglas de vida se mantuvieron fieles al modelo antiguo. No obstante, las dispensas que sobre el consumo de carne se fueron admitiendo cada vez más demuestran hasta qué punto se mezclaron estos dos sistemas de valores y de consumo.

Con todo, la cocina medieval fue muy diferente de las que la precedieron. Las especias orientales eran ya muy apreciadas y consumidas por las clases elevadas del Bajo Imperio, pero no fueron las empleadas en la Edad Media, o al menos no todas las que se empleaban. El Occidente cristiano formó su gama de sabores especiados a partir de un gran arsenal de productos de uso médico. Se tradujeron abundantes textos de medicina a partir del siglo XI y diversas sustancias utilizadas en la farmacopea habituaron poco a poco a los occidentales al sabor de las especias, que así fueron pasando de las estanterías del boticario a las del cocinero. Se les atribuían propiedades digestivas, por lo que se tomaban al final de las comidas, a menudo mezcladas con el azúcar de los dulces. Ahora bien, estas supuestas virtudes medicinales de las especias no bastan para explicar la variedad de su uso, que deja ver cuánto gustaban estas sustancias aromáticas.

Conforme a un extendido prejuicio, la cocina medieval sería deudora de la del mundo musulmán. Pero la verdad es que las cocinas de un lado y otro del Mediterráneo sólo presentaban un ligero parecido. Es cierto que los nombres de ciertos platos occidentales, algunos de los cuales llegaron hasta Inglaterra, tienen un indiscutible origen árabe, así los *Mawmenee* ingleses (ragú de pollo), que llevaban bastante vino (a veces incluso se flameaban con aguardiente); tomaron su nombre de la *mamuniya* árabe. Entre los productos exóticos que el mundo cristiano sacó del musulmán podemos citar la espinaca cultivada, la berenjena, las pastas secas de tipo filiforme —las *tria*—, etc. Sin embargo, las influencias árabes se centraron, sobre todo, en las zonas de contacto entre ambas civilizaciones.

Potaje, asado y entremés

Potajes, asados y entremeses (*entremets*: lo que se comía entre el asado y el postre) eran los tres platos principales que jalonaban una comida. Los alimentos se cocían, asaban o convertían en una pasta o masa. El potaje se elaboraba con carne o pescado, o incluso con legumbres, cocinados en una salsa más o menos espesa. El resultado podía ser tanto una sopa, tal y como entendemos hoy en día la palabra, como un puré o, incluso, una especie de ragú. La consistencia y la riqueza aromática del caldo eran los dos factores que establecían la diferencia entre las sopas sin ligar ni especiar y los potajes ligados y especiados. Ya lo dice su nombre, como el del puchero español: muchos de estos entrantes medievales se ponían a cocer en ollas (*pot* significa en francés olla), incluso cuando las carnes que constituían su base habían sido ya hervidas. Debemos recordar que durante mucho tiempo se creyó que todas estas cocciones previas eran completas, de manera que la carne perdía todo su sabor. Ahora bien, lo que a menudo se hacía al sumergir la carne en agua hirviendo no era más que ablandarla y limpiarla antes de ponerla a cocer a fuego lento (los tratados de cocina franceses llamaban a esto "*parboullir*").

Como su nombre indica, los asados eran platos de carne, en su mayoría de aves, silvestres o domésticas; seguían inmediatamente al potaje. En tiempo de Cuaresma, estas carnes eran reemplazadas por pescados a la parrilla o hervidos. Se tomaban sobre una larga re-

banada de pan, colocada a veces sobre un tajo de madera o de metal. Antes de introducir un trozo en la boca se mojaba previamente en una salsa contenida en una pequeña copa. El trinchado constituía una auténtica ceremonia. Lo ejecutaba el "escudero trinchador", a menudo un noble; debía ser elegante y preciso. Los trozos se presentaban de acuerdo con tres tipos de calidades: los "trozos de los señores", los "mejores trozos" y los "buenos trozos". Se servían muchas variedades de aves, entre ellas pavos reales, cigüeñas o cisnes, carnes cuyo consumo hace mucho que ha desaparecido. El asado era un factor de distinción social, un signo que distinguía, más que ningún otro de los elementos de la comida medieval, una mesa noble.

Los entremeses no presentaban esa coherencia; comprendían alimentos que se cocinaban de diversas formas, por ejemplo al horno. Los *pâtés*, preparados a la manera de los patés con corteza franceses de hoy, se impusieron en los recetarios del siglo XV. La parrilla tampoco estaba muy extendida y parece que quedaba reservada para los pescados. Tampoco era común la fritura, modo de elaboración que aparece ya entonces como una especialidad más bien mediterránea.

La pasión por las especias

Los cocineros medievales utilizaban muchas especias. No obstante, las interpretaciones de esta costumbre son a menudo erróneas. Vamos a citar sólo una a modo de ejemplo: el tópico de que los cocineros medievales utilizaban las especias para enmascarar carnes no demasiado frescas. Si admitimos esto, ¿cómo puede explicarse entonces que los ricos comensales que se permitían el lujo de pagar elevadas sumas por adquirir especias importadas de Oriente no pudieran conseguir carne fresca? Realmente, el empleo de las especias en la Edad Media es tan abundante y complejo que constituye un "mundo perdido". En los libros de cocina medievales se encuentra una gran variedad de aromas, sabores y colores hoy olvidados. Para los mercaderes medievales, el término "especias" designaba, en un principio, a todos los productos que eran objeto de comercio con Oriente (etimológicamente, el término procede del latín *species*, que significa especie o mercancía). A partir del siglo XIII adopta un significado más restringido y se aplica a los condimentos aromáticos que venden los "especieros".

El entusiasmo que la Edad Media experimenta por las especias se explica fácilmente por la carga simbólica que comportan tales productos. Llegadas de un Oriente cercano al Paraíso terrenal, se consideraba a las especias transmisoras de las virtudes (inmortalidad, longevidad) inherentes a semejante lugar de origen. Así, aún en el siglo XII se seguía creyendo que el nido del ave Fénix estaba hecho con corteza de canela. Y, ¿no fue, precisamente, el llamado "grano del paraíso" una de las especias más de moda a finales de la Edad Media?

Las especias, además de numerosas, eran muy variadas. La siguiente cita, tomada del *Viandier*, manuscrito que hoy se conserva en la biblioteca del Vaticano, lo pone de manifiesto claramente:

Especias de las que no puede prescindir el intendente [de las casas nobles y palacios]*: jengibre, canela, grano del paraíso, pimienta larga, espica [nardo], pimienta redonda, flor de la canela, nuez moscada, hoja de laurel, galanga, macis, comino, azúcar, almendras, ajo, cebolla, cebolleta y chalote.*

Aparte de no estar completa, esta lista es heteróclita, pues mezcla las plantas aromáticas cultivadas en los jardines europeos con los productos que se comerciaban con Oriente. Las especias, con independencia de cuál fuera su procedencia, se encuentran en todas las preparaciones culinarias, ya sean platos hechos al fuego lento, ya en las salsas que acompañan a pescados o carnes. Estos variados productos concurren en una paleta de sabores especiados sin parangón en toda la historia occidental. Ni antes, cuando la pimienta, arropada por algunas otras especias como el *silphium*, era la reina de la gastronomía romana, ni tampoco después, ya que a partir del siglo XVIII, la cocina francesa prescinde de las especias exóticas y se vuelca en las plantas aromáticas locales, como el ajo o el perejil.

Las cantidades utilizadas son impresionantes. Se calcula que los miembros de la corte del Delfinato consumían, hacia el año 1330, más de un kilogramo de especias por año y persona, cifra muy por encima de las mínimas cantidades que actualmente nos autorizamos en los países occidentales. Al disponer de abundantes especias, los jefes de cocina de las grandes ca-



3. ESTAS ESPECIAS, entre otras muchas cuyo uso se ha perdido actualmente, sazonaban los alimentos en la Edad Media: pueden verse aquí el ajo (*a la izquierda*), la nuez moscada (*en el centro*) y la pimienta redonda (*a la derecha*).

A.K.G. PARIS

sas las combinaban de diversas formas, asociando, por ejemplo, canela y jengibre, y las empleaban con discernimiento tanto en platos de pescado como de carne.

La pimienta larga era un elemento muy preciado de la cocina de Guillermo Tirel, que, bajo el seudónimo de Taillevent, se encargó de los fogones de, al menos, tres reyes franceses. Los palacios de la aristocracia preferían la pimienta larga a su pariente de la variedad redonda (la pimienta que usamos hoy en día). Sin embargo, había que importarla de lugares aún más lejanos que la pimienta redonda (que venía de la costa occidental de la India): del nordeste de la India o de Insulindia. Por esa razón la pimienta de la variedad larga sólo se vendía como "especias menudas", o sea, en pequeñas cantidades. Ahora bien, si los mayordomos de Carlos V o de Carlos VI consentían que se gastaran enormes sumas en la compra de tales productos era porque los reyes —igual que los nobles que se sentaban a sus mesas— apreciaban muchísimo el ardor áspero que producía la pimienta larga, la más picante de las especias; la fuerza de su sabor podría compararse con la de la guindilla, que reemplazó a la pimienta larga desde que comenzó a importarse de América.

El consumo de especias era un signo de distinción social heredado de la antigua Roma; no obstante, durante la Alta Edad Media (inmediatamente después de la Antigüedad), la gama de las especias utilizadas se amplía considerablemente, por ejemplo con la nuez moscada o la galanga (grueso rizoma nudoso de sabor ligeramente picante). Numerosas especias, tales como la manigueta y la cubeba, se utilizaron en un principio, como hemos dicho, por sus propiedades terapéuticas en la farmacia antes que en la cocina. Constituían la base de las salsas durante la Edad Media debido a las propiedades digestivas que se les atribuía.



B.N.F.

4. DURANTE LA CUARESMA se debía comer "magro" (sin carne). Los aristócratas parisienses comían carpas criadas en estanques o, incluso, pescado fresco capturado en Dieppe y transportado a lomos de caballerías por la noche.

El autor

BRUNO LAURIOUX, historiador, enseña en la Universidad París 1-Panteón-Sorbona y es secretario del Instituto Europeo de Historia de la Alimentación.

Cocina grasa y magra

En la Edad Media, la selección de los alimentos no dependía únicamente de factores regionales y sociales, sino también de otros de tipo cultural, entre los que la religión era uno de los más importantes. La religión imponía dos tipos de cocina medieval, ambos coexistentes: una para los días "grasos" (de carne) y otra para los "magros" (de vigilia). Como el deseo de comer bien no desaparecía los días de vigilia, los cocineros intentaban satisfacerlo; debían colmar la glotonería de los príncipes a los que servían, aunque respetando las prohibiciones religiosas. La alimentación de los períodos ordinarios se oponía a la del tiempo de abstinencia, en el que no se comía carne.

Para poner de manifiesto hasta qué punto la tensión entre "magro" y "graso" estaba siempre presente en el espíritu de los cocineros medievales, debemos recordar que la Iglesia Romana englobaba a la casi totalidad de la población medieval, exceptuando algunos pequeños núcleos heréticos, que se reivindicaban cristianos, y las comunidades judías. Las ocasiones de abstenerse de comer carne abundaban: entre la cuaresma, la vigilia de las grandes fiestas religiosas, el viernes y el sábado de todas las semanas, en más de cien días había que contentarse con comer pan, legumbres o pescado.

Cuando llegaba la Cuaresma, los aristócratas debían reemplazar las aves asadas con pescados a la plancha o cocidos, mientras que para los pobres la cocina de vigilia se confundía con el arenque o con el bacalao seco de Bretaña, que alimentaban, por ejemplo, a la población de la zona de Navarra enclavada en los Pirineos. Por el contrario, en las mesas de los ricos era la ocasión de degustar una cocina refinada, de productos caros: pescados de mar frescos, acarreados en una sola noche desde Dieppe hasta París por los "cazamareas" —caravanas constituidas por tiros de cuatro a seis caballos que arrastraban largos vehículos—, o carpas sacadas de los estanques con regularidad. Esta cocina de los días "magros" pretendía a menudo ser una exacta réplica de la de los días "grasos". Así, muchos libros de cocina incluían recetas dobles: una versión para los días normales y otra para los de vigilia, como si de esta forma se quisiera evitar cualquier tipo de ruptura en las costumbres alimentarias.

Las reglas que dictaba la Iglesia variaban de una región a otra; tenían en cuenta las costumbres y los productos locales y, al mismo tiempo, toleraban las innumerables artimañas inventadas por los fieles (o, más bien, por sus cocineros) para realzar los platos de los días de vigilia e, incluso, para enmascarar los propios de los días de carne de forma que pareciesen que eran de vigilia. Posiblemente, algunos de estos usos nacieron en las abadías, donde la abstinencia constituía la

regla y donde todo el arte culinario consistía en preparar platos humildes con apariencia de ricos. Las normas dictadas por la Iglesia no eran totalmente intransigentes, sino que cambiaban en función de las normas culturales y de las fuentes de abastecimiento de cada lugar. Algunos alimentos, como los dulces de Pascua o el roscón de Reyes, de los que hay tantas variedades como regiones, se convirtieron en símbolos festivos.

Durante la Edad Media, "graso" tiene, esencialmente, el sentido de "rico". Cocina de día graso no quiere decir cocina grasienta. Las frituras, aunque no estaban ausentes, no se utilizaban mucho, salvo en los países mediterráneos. ¿Se debía a la mala calidad de los aceites o a su elevado precio? El ejemplo de las salsas que los cocineros elaboraban permite hacernos una idea de la ligereza de la cocina de los días "grasos". La base de las salsas que acompañaban a los asados o a los pescados, a la plancha o hervidos, estaba constituida por una combinación de especias, primero molidas y después disueltas en un líquido del que el *Viandier* nos proporciona la receta:

Para diluir*: vino blanco, agraz* (jugo ácido extraído de uvas aún verdes)*, vinagre, agua, caldo graso, leche de vaca y leche de almendras*.

Este preparado, líquido, a menudo se espesaba con miga de pan, otras veces con almendras trituradas, higaditos de aves o con yema de huevo, pero nunca con harina. A estos ingredientes se les añadía en ocasiones algún edulcorante, como el azúcar. No llevaban ni mantequilla ni aceite: la única materia grasa que contenían era un caldo de buey o de ave. En resumen: las salsas medievales serían un modelo a seguir en las salsas recomendadas por las normas dietéticas actuales.

Preferencias nacionales y regionales

La gastronomía medieval apenas conoce fronteras. Los "europeos" de los siglos XIV y XV se diferencian por la manera en que sazonan sus respectivas cocinas. Todos son aficionados a las especias, pero en aquellos platos en que los *gourmets* continentales habrían empleado un poco de nuez moscada, los ingleses prefieren poner macis, es decir, el arilo que envuelve el grano de esta especia. Igual que los italianos y los españoles del nordeste, los ingleses añadían azúcar a sus platos salados, cosa que no hacían los franceses. A éstos, los alemanes les reprochaban que no dejaban bien hechas las carpas; cuando preparaban la comida cocineros franceses, exigían que se hiciese más su ración.

Estas costumbres no se pueden explicar *a priori*, ni por el suelo, ni por el clima, ni por los circuitos comerciales, ni por la presión religiosa, ni siquiera por las diferencias sociales. Los gustos delimitaban, por ejemplo, una Europa "de la mantequilla" (Flandes, Brabante y Hainaut); allí, los habitantes eran tan aficionados a la mantequilla que llegaban a ponerla hasta en la cerveza. Era también la Europa de la cerveza, que se presentaba en dos tipos: la *cervoise,* espesa y con pocos grados de alcohol, y las cervezas con lúpulo, difundidas desde Hamburgo y Bremen. A lo largo de la fachada atlántica europea, desde Normandía hasta el País Vasco, predominaba más bien la sidra. En el litoral mediterráneo se empezó a practicar el cultivo del olivo a gran escala; continuó siendo fiel al vino. Y fueron numerosas las variedades de cereales que se cultivaron. Los escoceses hacían de avena sus gachas, los gascones eran reputados comedores de mijo y, desde su lugar de origen germánico, el trigo sarraceno o alforfón fue penetrando en Bretaña.



5. LOS PRODUCTOS REGIONALES habían alcanzado ya un gran renombre. En la imagen, una clienta escoge peras cuidadosamente.

B.N.F.

Más allá de estos productos alimenticios básicos, los productos regionales consiguieron a partir de entonces una sólida reputación. Así, desde el siglo XIII, determinadas ciudades y regiones alcanzan un gran renombre por sus quesos (la región de Brie, por ejemplo) o sus pescados (la lamprea de Nantes, el esturión de Blaye). Se mencionaba a Saint-Denis por sus callos y a París por sus *pâtés*. En esta época, París era ya la capital a la que afluían los bienes del reino. ¿A quién habrían podido vender los pescadores, por ejemplo, el arenque de Dieppe si no hubiera sido a los acomodados burgueses y a los nobles que formaban la corte real? Eran estos mismos quienes pedían a sus médicos que les prescribiesen regímenes adecuados —y no demasiado restrictivos—, y los que constantemente buscaban ideas en las nuevas recetas recogidas por los grandes cocineros en sus recopilaciones.

A esta influencia de carácter regional se unía la de las modas pasajeras o la de aquellas otras que, por el contrario, consiguieron convertirse en hábitos permanentes. El grano del paraíso alcanzó un fulminante éxito en la cocina francesa a finales del siglo XIV, reemplazando a la pimienta, de sabor muy parecido. El Maestro Chiquart, cocinero del duque de Saboya y autor de uno de los tratados de cocina más apreciados del momento, le concede el primer puesto dentro de las especias. No obstante, ese éxito fue efímero, pues hacia 1500 el grano del paraíso desapareció casi totalmente

de las recetas francesas. Sin duda, las primeras exploraciones llevadas a cabo en las costas africanas permitieron aclarar que la preciosa especia no venía del Paraíso, con lo que perdió mucho del misterio que la envolvía.

Por el contrario, el azúcar, cuyo consumo se adoptó a finales del medievo, sigue aún empleándose actualmente. La llegada por aquella época de este edulcorante revolucionó, en unos pocos decenios, las costumbres alimentarias de los europeos. A comienzos del siglo XIV el azúcar aparece citado con frecuencia en las recetas inglesas e italianas, que dedicaban un amplio espacio a los sabores dulces o agridulces. Sin embargo, resultaba aún casi desconocido entre los cocineros franceses, que apenas si lo utilizaban, y únicamente en comidas de enfermos. Fue en el siglo XV cuando se generalizó el uso del azúcar; los sabores de finales de la Edad Media eran más dulces que los de los siglos anteriores.

La dietética entonces en vigor, perfilada a finales de la época medieval, procedía de la medicina clásica griega. Dentro de la terminología científica del momento, la dietética se ocupa de "las cosas que no son naturales", es decir, de los factores externos que permitían al cuerpo humano mantener sus funciones vitales frente a las enfermedades. La alimentación y la bebida sólo representaban una parte de una amplia disciplina, que incluía también el baño y el ejercicio físico, el sueño y las relaciones sexuales e, incluso, "las pasiones del alma". Al final de la Edad Media "comida y bebida" se convierten en el elemento esencial de la *dieta*, término de origen griego que puede traducirse por "régimen".

En los siglos XIV y XV los *Regímenes de salud*, manuales redactados para el mantenimiento de la salud corporal, le concedieron cada vez más primacía a la alimentación. Los productos alimenticios, por medio de sus llamadas cualidades principales (cálido y frío, seco o húmedo), fortalecían un temperamento dado o combatían una determinada enfermedad. Esas mismas cualidades formaban parte de los "humores", fluidos que circulaban por el cuerpo humano (la sangre era caliente y húmeda, la cólera caliente y seca, la melancolía fría y seca, la flema fría y húmeda) y cuyo exceso causaba las enfermedades. Además, el predominio de uno de estos "humores" definía el temperamento del individuo, que se clasificaba como sanguíneo, colérico, melancólico o flemático. Los estados de equilibrio podían modificarse —igual que los desequilibrios podían agravarse— con la intervención de diversas circunstancias externas, como, por ejemplo, las estaciones del año o la edad del individuo: una alimentación que calentase, rica en especias, era recomendable para los ancianos durante el invierno, pero se desaconsejaba a los jóvenes en la época estival. Por ello se comprende mejor por qué las cucurbitáceas, consideradas frías y húmedas, eran convenientes para las personas flemáticas, dominadas por estas mismas cualidades, al mismo tiempo que se recomendaban para las fiebres, que entrañaban un exceso de calor. Los médicos, entre ellos Arnau de Vilanova, aplicaban estos *Regímenes*; es una señal del prestigio alcanzado por las obras dietéticas. Sin lugar a dudas, el resurgimiento de la peste no fue ajeno a que los médicos prestaran una mayor atención a las conductas alimentarias, tratando, a la vez, de recuperar y conservar la salud: comer era un acto curativo, pero sobre todo preventivo.

El triunfo de la dietética

Los médicos respondían con sus tratados dietéticos a una preocupación por el cuidado corporal expandida en la sociedad medieval, pero debían tener en cuenta la obstinación de los gustos y los ardides del deseo culinario. Un autor admitía que los enfermos afectados por procesos febriles podían cansarse de comer sólo el interior de las tortas rellenas que les prescribe, así que les permite que tomen la masa, en teoría totalmente desaconsejada, pero siempre con la condición de que sea lo más ligera posible.

Los nobles y los aristócratas comían mucho, pero también debían hacerlo mejor que el resto. Los alimentos que más apreciaban eran las carnes de aves, desde el capón hasta el pollo, seguidas de las de cordero, ternera y cabra. Se preferían los ovinos a los bovinos, mientras que la carne de porcino, especialmente la que se salaba, ocupaba el puesto más bajo dentro de esta escala de apreciación alimentaria. Tampoco gozaban de mucha estima las legumbres; por el contrario, en las casas nobles se compraban frutas de modo regular.

Se debía a que las frutas se dan, por lo general, en los árboles, mientras que las legumbres proceden de la tierra. Los naturalistas medievales adoptaron de la Antigüedad clásica la idea de que el universo está ordenado verticalmente, partiendo de los objetos inanimados hasta llegar a Dios. Las plantas y los animales son clasificados de acuerdo con el medio del que proceden y en el que se mueven: los vegetales aparecen en la base de esta "Gran Cadena del ser", mientras que las aves ocupan los lugares superiores. Dentro de los vegetales, el mismo principio jerárquico llevaba a valorar más los árboles frutales que los arbustos con bayas que, a su vez, se encontraban situados por encima de las plantas con hojas que brotan de un tallo (col, guisante, menta), a las que no hay que confundir con las que tienen hojas que parten de la raíz (espinacas, lechugas y cardos). Los vegetales menos apreciados, considerados alimentos de las personas groseras y rudas, eran las hortalizas de raíz (zanahorias, rábanos) y los bulbos (cebolla, chalote, puerro, ajo) que crecen bajo tierra.

Todos estos elementos confluirían en la aparición de un discurso gastronómico. Los historiadores han podido constatar que no nace sino a finales de la Edad Media, en el momento en que las llamadas de atención de los teólogos frente al "pecado de la gula" fueron debilitándose. Para los hombres de la Iglesia, que predicaban la mesura y la moderación e, incluso, el ascetismo, todas las carnes tenían la temible propiedad de calentar el cuerpo de quien las comía, conduciéndolo inexorablemente a la lujuria. Por tanto, aunque todavía no se hiciese una abierta apología de los

placeres de la mesa, se ve cómo iban surgiendo preocupaciones gastronómicas, encubiertas en obras que, supuestamente, estaban destinadas a condenar tales placeres o, al menos, a recordar los límites religiosos dentro de los que tales placeres debían quedar confinados. La burla propia de las piezas cómicas es uno de los cauces a través de los que se insinúa el discurso gastronómico de la Edad Media, no digamos ya los pseudosermones o las vidas de santos que imitan el estilo de modelos prestigiosos para loar, en tono de burla, la morcilla o los cuartos de carnero. A modo de ejemplo, citaremos una *Vida de San Arenque*, martirizado de mil formas, basadas en las diversas maneras de cocinarlo, que debían de evocar realidades precisas y sabrosas en el espíritu de los lectores. Las enumeraciones y las digresiones gastronómicas abundan en unas u otras obras; esta verdadera invasión de los temas alimentarios pone de manifiesto el vivo interés existente por la mesa.

En la Edad Media había gastrónomos que hacían y deshacían la reputación de los platos y de los productos alimenticios. Se fueron permitiendo una delectación cada vez más insolente y explícita de los placeres de la mesa. Para que tomara forma un discurso gastronómico, sólo faltaba que se mezclara el material culinario con las preocupaciones dietéticas. Esto sucederá en 1460, en la obra *De Honesta Voluptate* del humanista italiano Platina; alcanzaría en el siglo XVI un enorme éxito en toda Europa. Es cierto que en esta obra se pueden encontrar las características de la gastronomía romana, pero contiene también el inventario de una gastronomía medieval rica e innovadora.

Bibliografía complementaria

LA GASTRONOMIE AU MOYEN ÂGE. 150 RECETTES DE FRANCE ET D'ITALIE. Odile Redon, Françoise Sabban y Silvano Serventi. Stock, 1991.

MANGER AU MOYEN ÂGE. DISCOURS ET PRATIQUES ALIMENTAIRES AUX XIV ET XV SIÈCLES. Bruno Laurioux. Hachette, 2002.

Origen y evolución de la pluma

1. LAS PLUMAS EVOLUCIONARON en los dinosaurios carnívoros bípedos antes del origen de las aves. La escena da vida a fósiles con plumas hallados en China. El dinosaurio imponente que devora al lagarto es *Sinornithosaurus*; a su derecha se encuentra *Sinosauropteryx*; el dinosaurio pequeño del árbol es *Microraptor*.



Durante largo tiempo se admitieron una serie de supuestos sobre los mecanismos originantes de las alas que la investigación reciente ha desmentido. La pluma no nació con las aves

Richard O. Prum
y Alan H. Brush

Pelo, escamas, piel o plumas. De todos los revestimientos corporales que ha creado la naturaleza, las plumas ofrecen la mayor diversidad. Encierran también el mayor misterio. ¿Cómo evolucionaron esos apéndices de increíble vigor, complejidad sorprendente y maravillosamente livianos? ¿De dónde procedían? Cinco años atrás, la ciencia carecía de respuestas. Pero el trabajo acometido en diferentes líneas de investigación ha convergido ya hacia una conclusión espectacular: antes de que aparecieran las aves, las plumas habían evolucionado en los dinosaurios.

El origen de las plumas es un caso específico del marco, mucho más general, del origen de las innovaciones evolutivas. Por tales se entienden las estructuras que no presentan antecedentes manifiestos en otros organismos anteriores, ni podemos asociar con estructuras afines (homólogas) de parientes contemporáneos. Aunque la teoría de la evolución proporciona una explicación consistente sobre la aparición de variaciones menores en el tamaño y la forma de los organismos y sus partes constituyentes, no ha aclarado todavía los mecanismos que determinan el advenimiento de estructuras completamente nuevas, tales como dedos, extremidades, ojos y plumas.

En el capítulo concreto del origen de las plumas, la búsqueda de una explicación encontró una dificultad añadida: las ideas arraigadas, que han resultado ser falsas. Para unos, la pluma primitiva había evolucionado por elongación y división de la escama reptiliana; según otros, las plumas aparecieron con una función específica, el vuelo. La ausencia de plumas primitivas fósiles no ayudaba a resolver la cuestión. Durante muchos años, el ave fósil más antigua era *Archaeopteryx lithographica*, que vivió en el Jurásico superior (hace aproximadamente 148 millones de años). Pero *Archaeopteryx* no aporta información novedosa sobre cómo evolucionaron las plumas; apenas si podemos distinguir las suyas de las que poseen las aves actuales.

KAZUHIKO SANO

Una gavilla de trabajos recientes, en campos muy dispares, ha obligado a prescindir de las viejas hipótesis. En primer lugar, los biólogos comprenden mejor los procesos de desarrollo, complejos mecanismos en cuya virtud el individuo crece hasta alcanzar su tamaño y forma definitivas, que arrojan nueva luz sobre la evolución de la anatomía de una especie. A este enfoque se le denomina biología evolutiva del desarrollo, o "evo-devo". Constituye una poderosa herramienta para sondear en el origen de las plumas.

En segundo lugar, los paleontólogos han hallado en China un generoso muestrario de dinosaurios con plumas. Estos organismos presentan una diversidad de plumas no tan evolucionadas como las que ofrecen las aves actuales o el propio *Archaeopteryx*. Proporcionan claves fundamentales sobre la estructura, función y evolución de los apéndices complejos de las aves.

Tomados en su conjunto, estos avances han configurado un cuadro detallado y revolucionario: las plumas aparecieron y se diversificaron en dinosaurios terópodos, carnívoros y bípedos antes del origen de las aves y del vuelo.

La pluma tubular

Este cuadro sorprendente se ha conjuntado, en buena medida, gracias a la comprensión de qué sea una pluma y cómo se desarrolla en un ave actual. Lo mismo que el pelo, las uñas o las escamas, las plumas son apéndices tegumentarios: órganos de la piel que se forman a través de la proliferación de las células de la epidermis, capa externa de la piel productora de proteínas de queratina. Una pluma típica está constituida por un vástago principal, el raquis. Unidas al raquis hay una serie de ramas, las barbas. Y como si se tratara de una reflexión fractal de raquis ramificado y barbas, éstas se hallan, a su vez, ramificadas: una serie de filamentos pares, o bárbulas, hincan en el eje principal de la barba, el ramus. En la base de la pluma, el raquis se expande para formar un eje tubular hueco, el cálamo, que se inserta en el folículo de la piel. Las aves mudan periódicamente el plumaje, que evidencia el crecimiento de nuevas plumas a partir de los mismos folículos.

Las variaciones en la forma y estructura microscópica de las barbas, bárbulas y raquis dan lugar a un extensísimo repertorio de plumas. Ahora bien, pese a tamaña diversidad, la mayoría de las plumas pertenecen a dos categorías estructurales. Una pluma alargada en penacho, la pennácea típica, consta de un raquis prominente y barbas que forman el vano o vexilo. Las barbas del vexilo están, a su vez, unidas por pares de bárbulas especializadas. Las bárbulas de la parte superior de la pluma poseen una serie de garfios que se aferran a surcos de las bárbulas adyacentes. Las plumas pennáceas cubren el cuerpo de las aves; las barbas, apretadas unas contra otras, crean las superficies aerodinámicas de alas y cola. A diferencia de la pennácea, la pluma plumulácea, o plumón, posee un raquis rudimentario y un mechón revuelto de barbas y bárbulas. Las bárbulas, largas y enredadas, proporcionan a estas plumas su ligereza y sus maravillosas propiedades térmicas así como un tacto confortable. Las plumas pueden tener un vexilo pennáceo y una base plumulácea.

En esencia, todas las plumas son variaciones a partir de un tubo producido por la proliferación de la epidermis con la papila dérmica nutricia en el centro. Aun cuando la pluma despliegue una ramificación dendriforme, crece desde la base igual que un pelo. ¿Cómo consiguen esto las plumas?

El crecimiento de la pluma empieza con un engrosamiento de la epidermis, la placoda. Se alarga ésta y forma un tubo, el germen de la pluma. La proliferación anular de las células alrededor del germen crea una depresión cilíndrica, el folículo, que constituye su base. El crecimiento de células queratinosas o queratinocitos en la epidermis del folículo —el "collar" folicular— empuja a las células viejas hacia arriba y hacia el exterior, proceso que terminará por generar la pluma entera de una forma orquestada y que representa una de las maravillas de la naturaleza.

Como parte de esta coreografía, el collar folicular se dividirá en una serie de crestas longitudinales —barbas incipientes— que formarán cada una de las barbas. En una pluma alargada o en penacho (pennácea), las barbas crecen helicoidalmente alrededor del germen tubular de la pluma y se fusionan por un lado formando el raquis. Simultáneamente y por el otro la-

Los autores

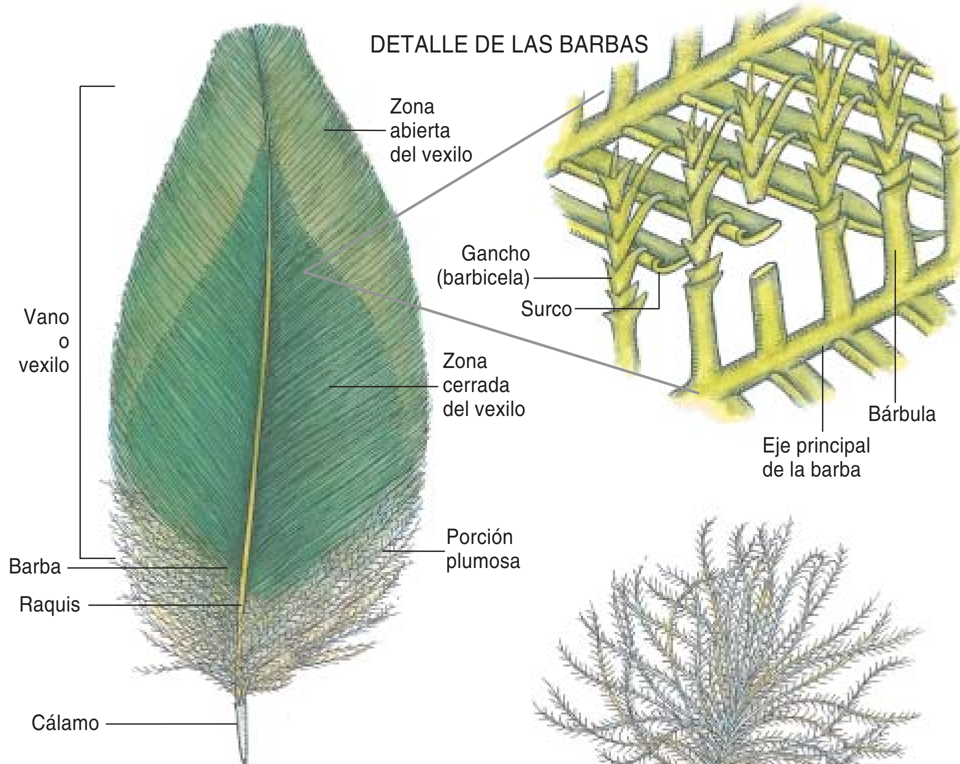
RICHARD O. PRUM y ALAN H. BRUSH comparten una misma pasión sobre la biología de las plumas. Prum, profesor asociado de ecología y biología evolutiva de la Universidad de Kansas, ha centrado su campo de investigación en la filogenia de las aves, los sistemas de cortejo y cría, la física de los colores estructurales y en la evolución de las plumas. Brush, docente emérito de ecología y biología evolutiva de la Universidad de Connecticut, ha trabajado en los pigmentos de las plumas y en la bioquímica de la queratina.

Resumen/*Evolución de la pluma*

- A través del estudio del desarrollo de una pluma de un ave actual podemos entender el curso evolutivo seguido durante períodos prehistóricos que nos son inaccesibles. El recurso al desarrollo para así conocer la evolución ha configurado una nueva disciplina: la biología evolutiva del desarrollo, abreviada "evo-devo".
- De acuerdo con la teoría del desarrollo aplicada al estudio del origen de las plumas, éstas atravesaron una serie de estadios. Cada uno supone la adquisición de una novedad evolutiva que concernía al sistema de crecimiento, novedad que se convirtió en sustrato de la innovación siguiente.
- La nueva teoría halla respaldo en diversas áreas de la biología y la paleontología. La prueba más sugestiva procede de fósiles de dinosaurios cuyo plumaje ha aparecido en los diferentes estadios predichos por el modelo.

LA NATURALEZA DE LAS PLUMAS

LAS PLUMAS PRESENTAN UNA SORPRENDENTE DIVERSIDAD y cumplen funciones muy dispares, desde el cortejo hasta el vuelo, pasando por el camuflaje. Responsables de esa diversidad son las variantes en barbas, bárbulas o raquis, los componentes estructurales del apéndice. Ello no obstante, podemos agrupar las plumas en dos tipos básicos. La pluma alargada en penacho, o pluma pennácea, es la típica del ala. El plumón, o pluma plumulácea, es la pluma blanda, suave y enmarañada que proporciona aislamiento térmico.



LA PLUMA EN PENACHO. Las barbas fusionadas por pares con el raquis central constituyen el vano o vexilo. En la porción cerrada de éste, los ganchos (barbicelas) de unas bárbulas se anclan en los surcos de bárbulas adyacentes (*detalle* y *microfotografía del centro*) para formar una superficie fuerte y consistente. En la porción abierta del vano, las bárbulas no se unen entre sí. Las plumas con vexilo cerrado son fundamentales para el vuelo.

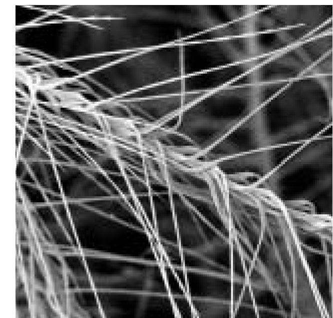
PLUMON O COBERTERA. El plumón carece de vexilo. Presenta un raquis rudimentario y un mechón de barbas con bárbulas elongadas.



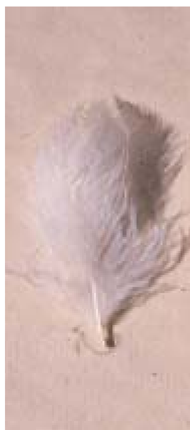
Vexilo abierto



Ampliación de la zona de vexilo cerrado



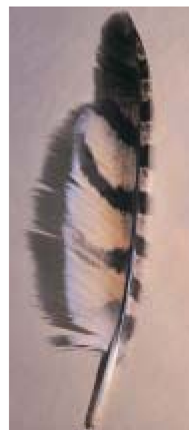
Plumón (cobertera)



PLUMA DE COBERTERA. La estructura en forma de mechón proporciona aislamiento térmico.



PLUMA DE CONTORNO. El vexilo plano ayuda a realzar la silueta del cuerpo.



PLUMA PARA EL VUELO. El vexilo asimétrico produce fuerzas aerodinámicas.

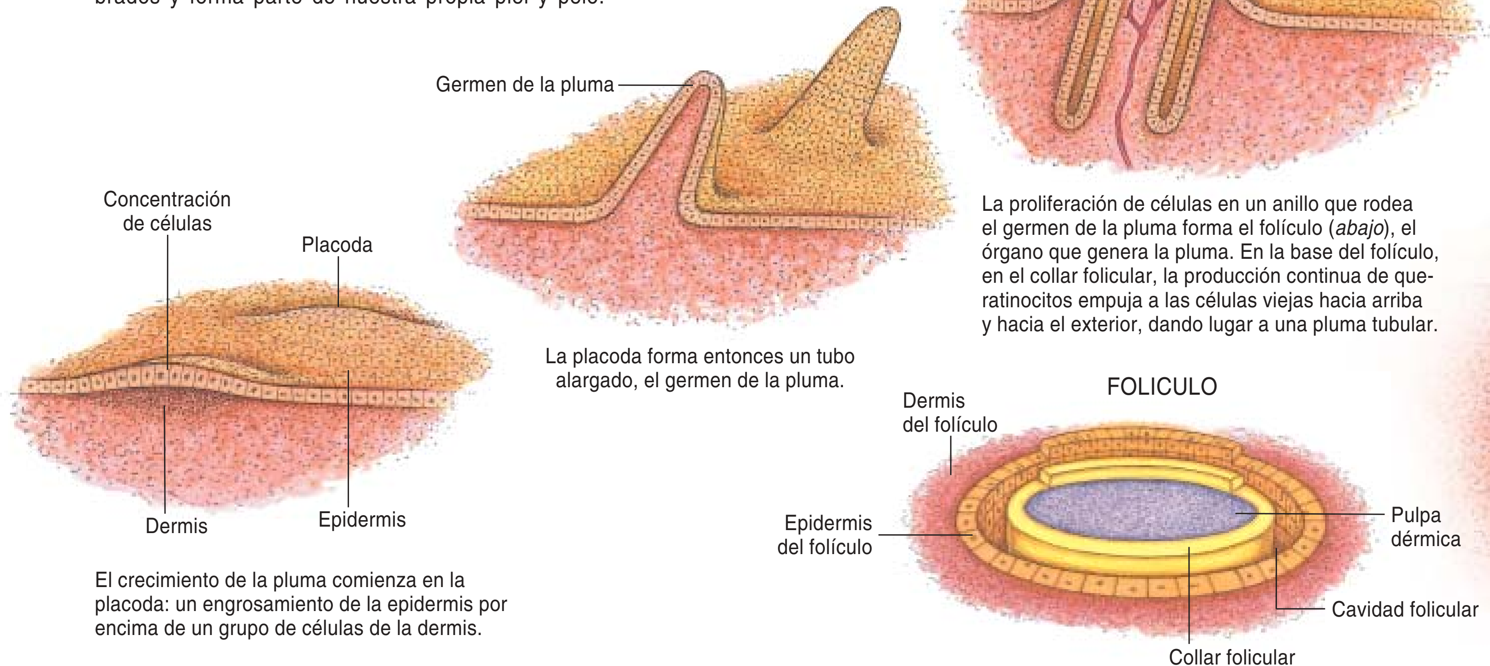


PLUMAS PUNTIAGUDAS. Dos especies de cacatúa muestran plumas nuevas, en fase de desarrollo.

ILUSTRACIONES DE PATRICIA J. WYNNE; MICROGRAFIAS DE TIM LEE QUINN; TINA WEST (*fotografías de plumas*); GAIL J. WORTH *Aves International* (*cacatúas*)

CRECIMIENTO DE LA PLUMA

AL IGUAL QUE EL PELO, LAS UÑAS Y LAS ESCAMAS, las plumas crecen por proliferación y diferenciación de queratinocitos. Estas células epidérmicas productoras de queratina dejan, al morir, depósitos de queratina en la piel. La queratina está constituida por filamentos de proteínas que polimerizan para crear estructuras sólidas. Las plumas están formadas por beta-queratinas, exclusivas de reptiles, aves incluidas. Durante el crecimiento, la cubierta externa, de función protectora, está formada por alfa-queratina, mucho más blanda, que se encuentra en todos los vertebrados y forma parte de nuestra propia piel y pelo.



El crecimiento de la pluma comienza en la placoda: un engrosamiento de la epidermis por encima de un grupo de células de la dermis.

La placoda forma entonces un tubo alargado, el germen de la pluma.

La proliferación de células en un anillo que rodea el germen de la pluma forma el folículo (*abajo*), el órgano que genera la pluma. En la base del folículo, en el collar folicular, la producción continua de queratinocitos empuja a las células viejas hacia arriba y hacia el exterior, dando lugar a una pluma tubular.

PATRICIA J. WYNNE

do, se desarrollarán nuevas barbas incipientes. En los plumones, sin embargo, las barbas incipientes crecen sin movimiento helicoidal. En ambos tipos de plumas, las bárbulas se desarrollan a partir de la placa barbular, una capa de células que se halla en la periferia de la cresta de la barba.

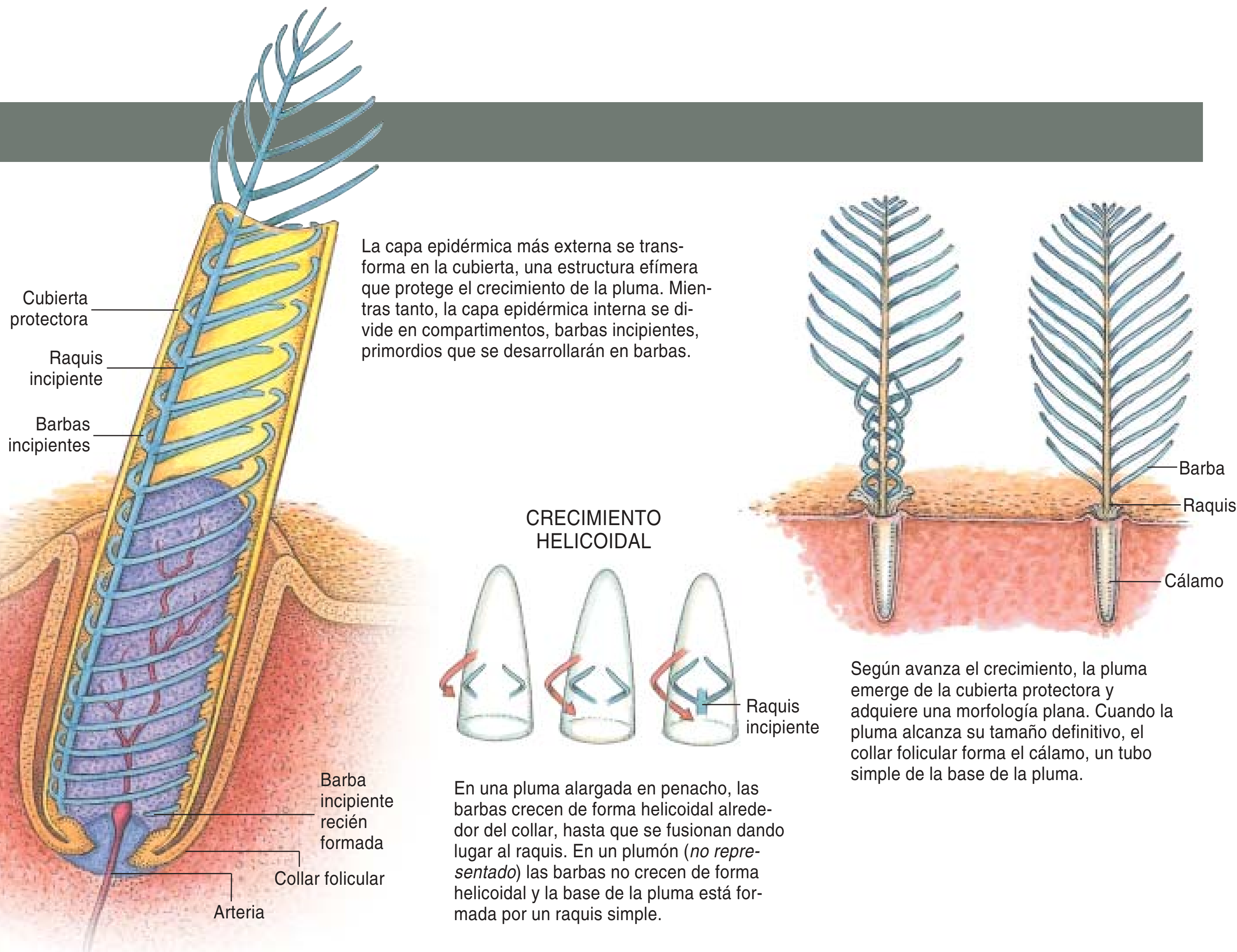
Evo-devo

Nosotros pensamos que el proceso de desarrollo de una pluma puede arrojar luz sobre la probable naturaleza de las estructuras primitivas que, en el curso de la evolución, fueron las precursoras de la pluma. De acuerdo con la teoría del desarrollo que propugnamos, las plumas evolucionaron a través de una serie de estadios de transición, señalado cada uno por la aparición de una novedad evolutiva, es decir, un nuevo mecanismo de crecimiento. Los avances alcanzados en un estadio sirvieron de plataforma para la innovación siguiente.

En 1999 propusimos el esquema evolutivo que resumimos. El estadio 1 consistió en un alargamiento tubular de la placoda a partir del germen de pluma y del folículo. Se produjo así la primera pluma: un cilindro hueco sin ramificaciones. Posteriormente, en el estadio 2, el collar folicular, un anillo de tejido epidérmico, se diferenció (especializó): la capa interna se convirtió en las crestas longitudinales generadoras de barbas; la capa externa, en una funda protectora. En ese estadio se adquirió un penacho de barbas fusionadas con un cilindro hueco o cálamo.

Para explicar el estadio siguiente, el tercero, nuestro modelo ofrece una doble opción: o bien el origen del desarrollo helicoidal de las barbas incipientes y formación del raquis (estadio 3a) o bien el origen de las bárbulas (estadio 3b). La duda sobre qué proceso ocurrió antes surge porque el desarrollo de la pluma no aclara qué acontecimiento precedió al otro. En el estadio 3a el folículo generaría una pluma con un raquis y una serie de barbas simples; en el estadio 3b, produciría un penacho de barbas con bárbulas ramificadas. Independientemente de cuál de los dos procesos ocurriera antes, la evolución de los rasgos de ambos, estadio 3a + b, daría lugar a las primeras plumas con ramificación doble, constituidas por un raquis, barbas y bárbulas. Debido a que estas últimas permanecían todavía indiferenciadas en ese estadio, una pluma debió ser al principio un penacho abierto; esto es, el vexilo no formaría una superficie fuerte y consistente donde las bárbulas se hallaran imbricadas.

Durante el estadio 4 se desarrollaron las bárbulas. Este avance permitió que un folículo de estadio 4 produjera garfios (barbicelas) en los extremos de las bár-



bulas que pudieran fijarse a los surcos de las bárbulas de las barbas adyacentes para crear una pluma pennácea con un vexilo plano cerrado. Después del estadio 4, aparecerían nuevas variaciones en la pluma, incluidas las numerosas especializaciones que observamos en el estadio 5, tales como el vexilo asimétrico de la pluma adaptada al vuelo.

El modelo generador

Esta teoría se inspira en la observación del propio desarrollo jerárquico de las plumas. Predice, por ejemplo, que una simple pluma tubular precedió a la evolución de las barbas, porque éstas se crearon por diferenciación del tubo en crestas o barbas incipientes. En el mismo orden, el plumón precedió a las plumas alargadas en penacho con raquis, pues el raquis se constituye mediante fusión de crestas generadoras de barbas. Una lógica similar subyace en cada uno de los diferentes estadios postulados por nuestro modelo de desarrollo.

En parte, la teoría se apoya en la diversidad de las plumas de las aves actuales, con ejemplos de cada uno de los estadios del modelo. Lógicamente, estas plumas son simplificaciones, recientes y derivadas por evolución, que nos remiten a estadios que se dieron en el curso de su filogénesis, pues esta compleja diversidad de plumas (propia del estadio 5) debió de surgir antes de *Archaeopteryx*. Las plumas modernas demuestran que todos los estadios propuestos se inscriben en la capacidad de desarrollo que poseen los folículos. Por tanto, para explicar el origen de la diversidad, la teoría del desarrollo evolutivo de las plumas no necesita apelar a ninguna estructura puramente hipotética.

En apoyo de nuestra tesis, podemos aducir los excepcionales hallazgos moleculares que confirman los primeros tres estadios del modelo evo-devo. Las técnicas modernas nos permiten penetrar en el interior de las células y comprobar, a través del estudio de las proteínas, si hay genes específicos implicados. En el laboratorio se han combinado estos métodos con técnicas experimentales, para así determinar la función de las proteínas cifradas por dichos genes y expresadas durante el desarrollo de las plumas.

Matthew Harris y John F. Fallon, de la Universidad de Wisconsin-Madison, y uno de nosotros (Prum) hemos estudiado dos genes importantes en la formación de patrones: el *Shh* y el *Bmp2*. Se trata de genes que desempeñan un papel crucial en el desarrollo de las extremidades de los vertebrados, dedos y apéndices tegumentarios, tales como pelo, dientes y uñas. Y hemos descubierto que las proteínas Shh y Bmp2 operan como un par modular de moléculas señalizadoras que, al igual que un componente electrónico de fun-

ción múltiple, se reutiliza repetidamente a lo largo del desarrollo de la pluma. La proteína Shh induce la proliferación celular; la proteína Bmp2 regula el alcance de la proliferación y promueve la diferenciación de las células.

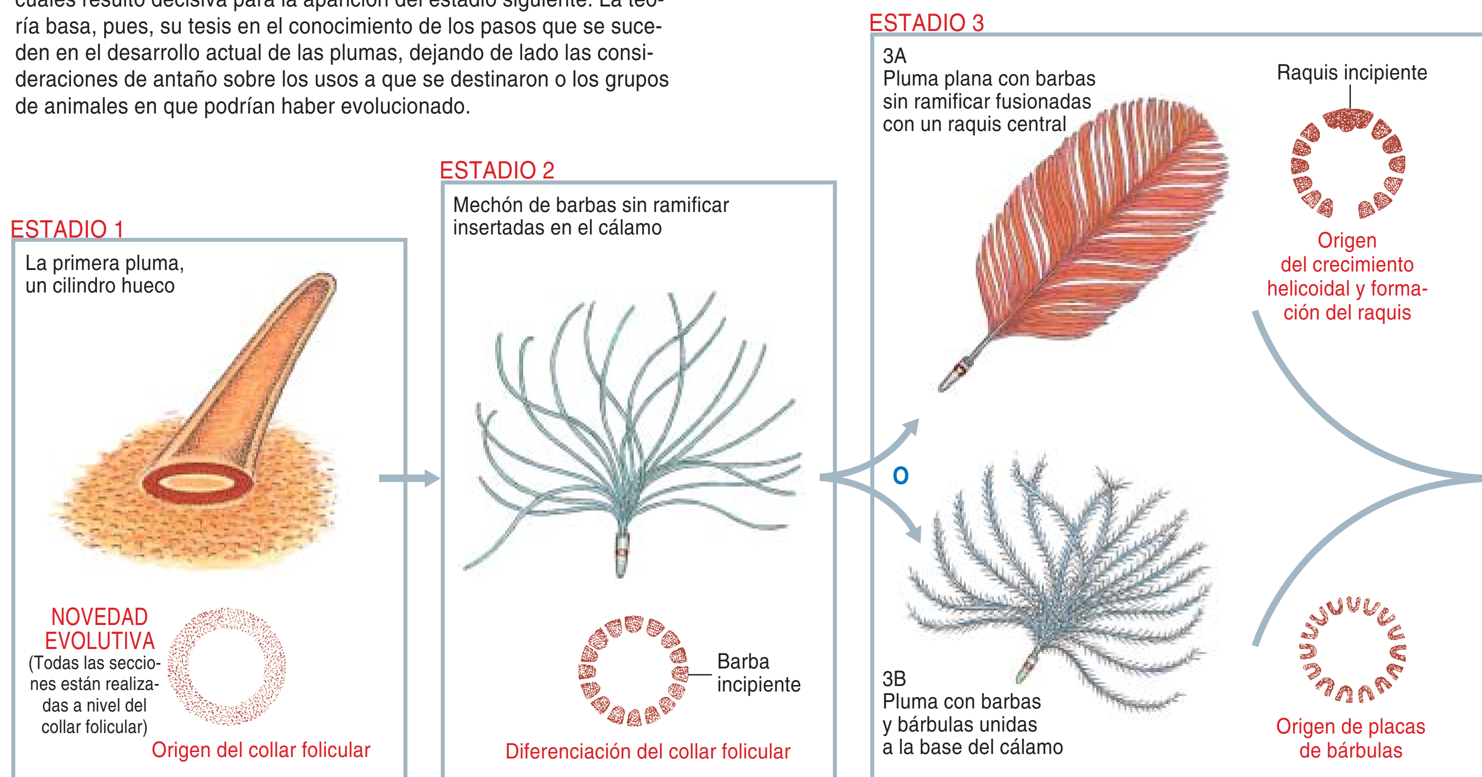
La expresión de las proteínas Shh y Bmp2 comienza en la placoda de la pluma. Allí se produce este par de proteínas según un patrón polarizado anteroposterior. A continuación, se expresan Shh y Bmp2 en la punta del germen tubular de la pluma durante su alargamiento inicial y, luego, en el epitelio que separa las barbas incipientes, para establecer un patrón de desarrollo de las crestas. En las plumas de penacho, las pennáceas, la señalización de Shh y Bmp2 esboza un patrón para el desarrollo helicoidal de las barbas incipientes y formación del raquis. En los plumones, las señales de las proteínas Shh y Bmp2 crean, sin embargo, un simple patrón del desarrollo de las barbas. Cada estadio de desarrollo de la pluma presenta una pauta peculiar de la función señalizadora de Shh y Bmp2. Una y otra vez, las dos proteínas cumplen misiones decisivas en el curso de la gestación de la pluma hasta que ésta adquiere su forma definitiva.

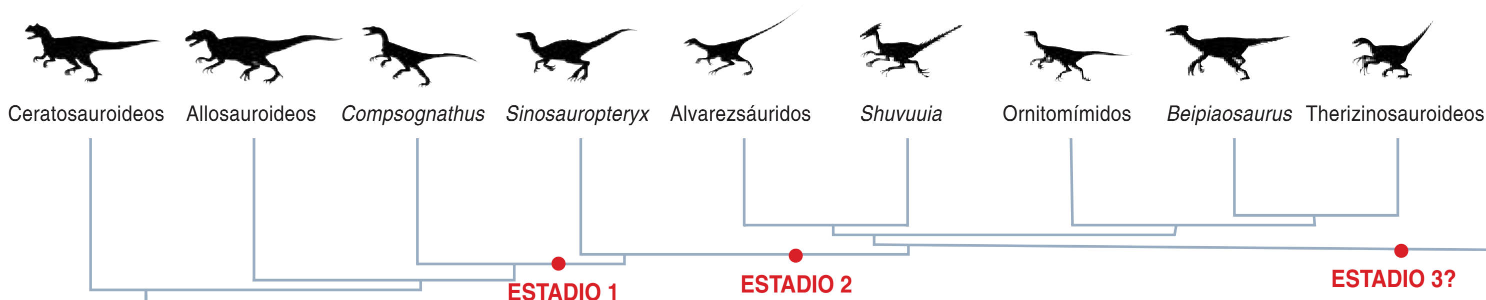
La investigación molecular confirma que el desarrollo de las plumas consta de una serie de estadios jerárquicos, en los que un episodio posterior depende, en

EVO-DEVO Y LA PLUMA

LA TEORIA DE LOS AUTORES sobre el origen de la pluma brotó tras reflexionar sobre los mecanismos de desarrollo. Advirtieron que pueden éstos dar cuenta de la aparición de novedades evolutivas: un campo denominado evo-devo. De acuerdo con el modelo propuesto, las características singulares de las plumas evolucionaron a través de una serie de innovaciones en el modo de crecimiento, cada una de las cuales resultó decisiva para la aparición del estadio siguiente. La teoría basa, pues, su tesis en el conocimiento de los pasos que se suceden en el desarrollo actual de las plumas, dejando de lado las consideraciones de antaño sobre los usos a que se destinaron o los grupos de animales en que podrían haber evolucionado.

Debemos a los descubrimientos recientes de fósiles en Liaoning las primeras comprobaciones del modelo propuesto: en los dinosaurios terópodos se dio la evolución de las plumas según la secuencia de estadios establecida por la teoría de los autores. Partiendo de las semejanzas entre las estructuras teóricas de las plumas primitivas y la forma real de éstas en los fósiles, los autores sugieren que cada estadio evolucionó en un grupo particular de dinosaurios.

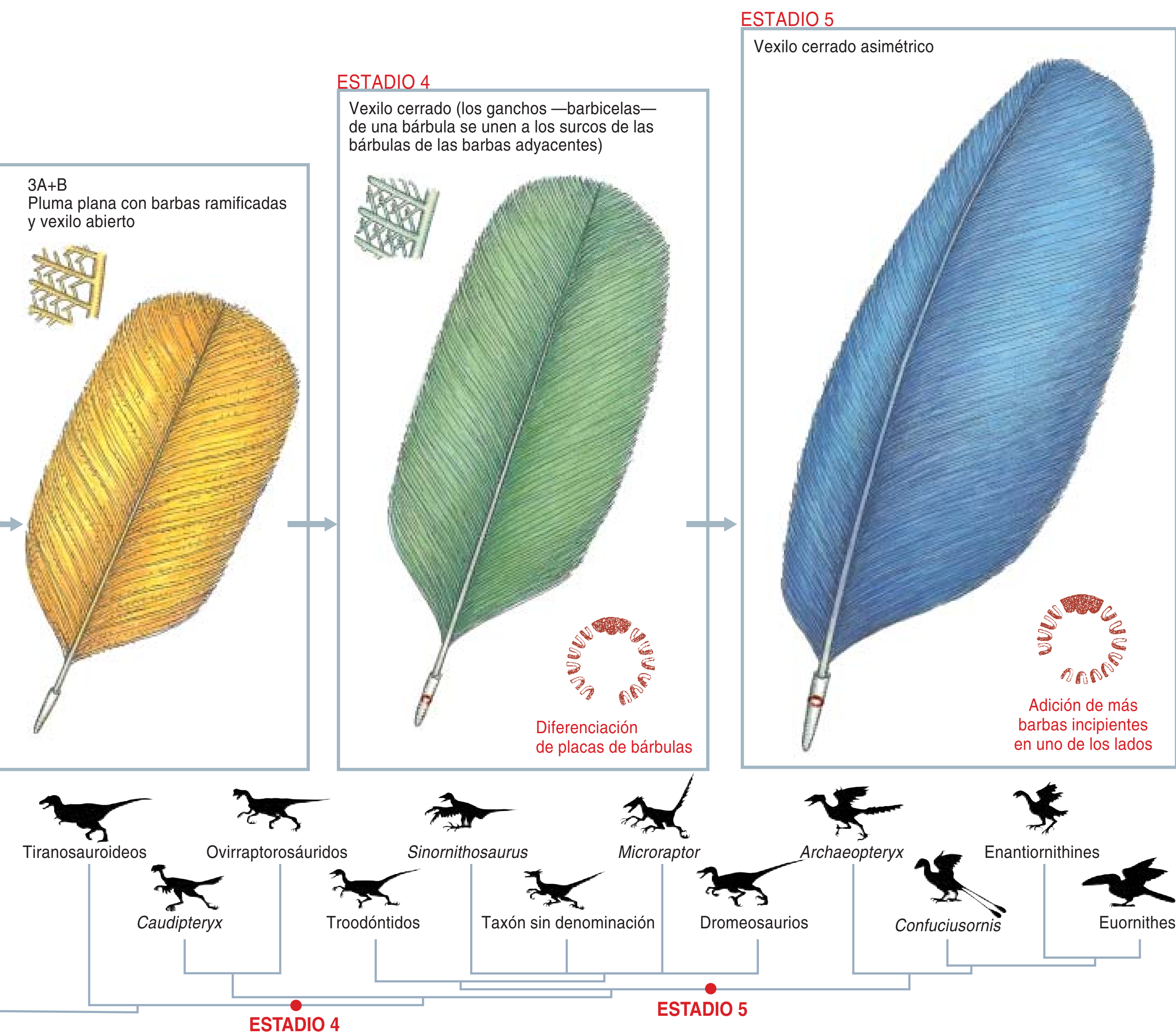




su mecanismo estructural, del episodio que le ha precedido. Así, la evolución de las fibras longitudinales en la expresión Shh-Bmp2 se halla vinculada al desarrollo previo de un germen tubular elongado. Del mismo modo, las variaciones en la creación de patrones por Shh-Bmp2 durante el desarrollo de una pluma en penacho dependen, a su vez, del desarrollo previo de las fibras longitudinales. Por consiguiente, los resultados moleculares se ajustan muy bien a un modelo según el cual las plumas iniciaron su andadura en un tubo hueco elongado (estadio 1), pasaron por un mechón de barbas (estadio 2) y adquirieron luego una estructura pennácea (estadio 3a).

Protagonistas

Nuestro planteamiento se ha aprovechado de nuevos marcos teóricos, al par que el progreso en el refinamiento de las técnicas de laboratorio ha permitido seguir el proceso de desarrollo desde una célula hasta la formación de una pluma. Con todo, ha sido un trabajo detectivesco a la antigua usanza el que nos ha proporcionado la prueba más espectacular en favor de la teoría del desarrollo evolutivo. Se ha llevado a cabo en las canteras fosilíferas del norte de China. Paleontólogos chinos, estadounidenses y canadienses han descubierto, en la provincia de Liaoning, una rica colección de fósiles del Cretácico inferior en sedimen-





2. LOS FOSILES DESCUBIERTOS, a lo largo de los últimos cinco años, en las canteras de Liaoning, como la extremidad anterior de *Caudipteryx*, revelan la presencia de plumas en los apéndices. Este dinosaurio, que tenía aproximadamente el tamaño de un pato, presentaba plumas alargadas en la cola y en las extremidades anteriores.

MICK ELLISON

tos de la Formación Yixian (124 a 128 millones de años de antigüedad).

Las excelentes condiciones que allí coincidieron han conservado un conjunto espléndido de organismos extintos, incluido el más antiguo mamífero placentario, la más antigua planta con flor, abundante cantidad de aves y una amplia diversidad de dinosaurios terópodos con conspicuos detalles tegumentarios. Dinosaurios de linajes diferentes poseían plumas totalmente modernas, así como tipos distintos de estructuras primitivas de plumas. La inferencia es concluyente: las plumas se originaron y evolucionaron hasta alcanzar su estructura moderna en un grupo de dinosaurios carnívoros, bípedos y terrestres, antes incluso de la aparición de las aves y del vuelo.

El primer dinosaurio con plumas encontrado allí, en 1997, fue un celurosaurio del tamaño de un pollo (*Sinosauropteryx*); poseía en su piel pequeñas estructuras tubulares, ramificadas quizá. Posteriormente, se descubrió un ovirraptorosaurio del tamaño de un pato (*Caudipteryx*) que poseía, tanto en la zona terminal de la cola como en las extremidades anteriores, hermosas plumas en penacho de aspecto moderno. Algunos escépticos pensaron que *Caudipteryx* era simplemente un ave corredora, pero el análisis filogenético lo sitúa entre los dinosaurios terópodos ovirraptorosaurios.

Nuevos hallazgos en el yacimiento de Liaoning han proporcionado plumas en penacho en diversos especímenes de dromeosaurios, los terópodos que se suponen más cercanamente emparentados con las aves, aunque no son aves en absoluto.

En resumen, se han encontrado plumas fósiles en más de una docena de dinosaurios terópodos no avianos; entre ellos, un tericinosaurio del tamaño de un avestruz, *Beipiaosaurus*, así como en los dromeosaurios *Microraptor* y *Sinornithosaurus*.

La heterogeneidad de las plumas observadas en estos dinosaurios, sorprendente, suministra una prueba directa de la teoría del desarrollo. Las plumas más primitivas conocidas —las de *Sinosaurpteryx*— son también las estructuras tubulares más simples; guardan una extraordinaria semejanza con las postuladas por el modelo para el estadio 1. *Sinosauropteryx*, *Sinornithosaurus* y algunos otros terópodos no avianos muestran estructuras, sin raquis, en forma de mechón, cabalmente congruentes con el estadio 2 del modelo. Existen, asimismo, plumas alargadas en penacho que obviamente han diferenciado bárbulas y vexilos planos, igual que en lo predicho por el modelo para el estadio 4.

Estos fósiles abren un nuevo capítulo en el estudio del tegumento de los vertebrados. Sabemos que las plumas aparecieron primero en un grupo de dinosaurios terópodos y se diversificaron, posteriormente, en otros grupos de terópodos antes del origen de las propias aves. Entre los numerosos dinosaurios con plumas, las aves sólo representan un grupo particular que adquirió la capacidad de volar al utilizar las plumas presentes en sus brazos y colas. *Caudipteryx*, *Protopteryx* y los dromeosaurios muestran un "abanico" de plumas en la zona posterior de la cola, lo que sugiere que el plumaje de las aves modernas se había desarrollado ya en los terópodos.

La recuperación de hallazgos fósiles tan excepcionales ha obligado a redefinir el concepto de ave; exige también replantearse la biología e historia de los dinosaurios terópodos. Las aves —que incluyen todas las especies descendientes de un antecesor común a *Archaeopteryx* y a las aves modernas— se han venido definiendo tradicionalmente como vertebrados con plumas y con capacidad voladora. Ahora debemos decir que las aves son un grupo de dinosaurios terópodos con plumas que desarrollaron la capacidad de vuelo activo.

Los nuevos descubrimientos han colmado el vacío que había entre las aves y los dinosaurios, hasta el punto de que resulta harto difícil precisar la noción de ave. Y a la inversa, muchos dinosaurios atractivos para el gran público, como *Tyrannosaurus* y *Velociraptor*, pese a no haber sido aves, han podido poseer plumas en su tegumento.

Una nueva mirada

Gracias a los últimos descubrimientos, podemos cribar las hipótesis propuestas sobre el origen de las plumas. Las nuevas pruebas proporcionadas por la biología del desarrollo arruinan la vieja idea que cifraba el origen de las plumas en la elongación de las escamas. Hasta transformarse en plumas, defendía, las escamas se alargaron, luego desarrollaron bordes replegados y, por fin, produjeron bárbulas encajantes. Sin

¿AVES O DINOSAURIOS? LA DISTANCIA SE ACORTA

A los fósiles indicados en el texto hemos de agregar el descubrimiento de un nuevo espécimen en China: un dinosaurio en cuyas extremidades anteriores y posteriores portaba plumas asimétricas, el único tipo de plumas útiles para el vuelo. Antes de ese hallazgo pensábase que sólo las aves poseían plumas asimétricas. De hecho, estas plumas constituían el único carácter que distinguía las aves de sus antecesores dinosaurianos. Pero, por lo que se ve, las plumas útiles para el vuelo, además de las plumas en cuanto tales, aparecieron antes que las propias aves.

Según Xing Xu, Zhonghe Zhou y sus colaboradores, del Instituto de Paleontología de Vertebrados y Paleoantropología de la Academia de Ciencias de China, la especie de *Microraptor* recién hallada contaba con plumas asimétricas similares a las que constituyen las alas. Incluso acentúan su asimetría hacia el final de la extremidad, igual que ocurre en las aves actuales.

En el debate sobre el origen del vuelo de las aves solían enfrentarse dos hipótesis: la que proponía que el vuelo se desarrolló desde los árboles, a través de un organismo planeador intermedio, y la que abogaba por un vuelo arrancado desde el suelo, a través de una forma corredora. Ambas hipótesis se apoyan en pruebas de peso. Para Xu, el nuevo hallazgo de *Microraptor* refuerza la hipótesis arborícola, puesto que la presencia de alas anteriores y posteriores serviría como un "perfecto plano aerodinámico". Con todo, persisten abiertas cuestiones importantes; por ejemplo, ¿cómo utilizó *Microraptor* sus cuatro alas?



EL RECIEN DESCUBIERTO *Microraptor gui*

embargo, como hemos visto, las plumas son tubos. Ambos lados planos del vexilo —en otras palabras, la zona anterior y la posterior— están creados por la parte interior y exterior del tubo, una vez que la pluma se ha liberado de la vaina protectora. En cambio, los dos lados de una escama se forman a partir del borde superior e inferior de la excrecencia epidérmica inicial que genera la escama.

Las nuevas aportaciones obligan a dejar de lado la teoría, extendida y muy arraigada, según la cual las plumas se desarrollaron sobre todo, o en principio, para el vuelo. Sólo la forma más evolucionada —la pluma asimétrica con un vexilo cerrado, que apareció en el estadio 5— servía para el vuelo. Afirmar que la evolución desarrolló las plumas para el vuelo viene a valer hoy lo mismo que decir que los dedos han evolucionado para tocar el piano. Antes bien, las plumas fueron escogidas para su función aerodinámica una vez que adquirieron suficiente complejidad estructural y de desarrollo. Con otras palabras, habiendo evolucionado con otra misión, se aprovechó su potencialidad para una aplicación diferente.

Se han propuesto varias hipótesis sobre las funciones plausibles a cumplir por las plumas primitivas: aislamiento térmico, repulsión del agua, cortejo, camuflaje y defensa. Pese a la copiosa información paleontológica recabada, no parece, sin embargo, probable que lleguemos a entender en su plenitud cuál fue la biología del linaje en que evolucionaron las plumas para así determinar cuál de estas hipótesis se acerca más a la realidad.

Nuestra teoría subraya que las plumas aparecieron a través de una serie de innovaciones producidas en su desarrollo, cada una las cuales pudo haber evolucionado para desempeñar en su origen una función diferente. Sabemos, sin embargo, que las plumas surgieron una vez se formaron, en el tegumento de algunas especies, un germen tubular y un folículo. Por consiguiente, las primeras plumas evolucionaron porque estos apéndices tubulares, que crecieron fuera de la piel, comportaron alguna ventaja para la supervivencia.

Los fijistas y otros escépticos ante la teoría de la evolución han esgrimido a menudo las plumas para denunciar las carencias de la tesis evolutiva. Aducían que no había formas de transición entre las escamas y las plumas. Objetaban por qué la selección natural a favor del vuelo debía dividir y elongar la escama primero y luego desarrollar nuevos mecanismos que destejían lo anterior. Ahora, por ironía del destino, las plumas nos ofrecen un brillante ejemplo para entender el proceso de adquisición y desarrollo de una novedad evolutiva: investigando los caracteres que son realmente nuevos y observando cómo se forman éstos en los organismos actuales.

XING XU

Bibliografía complementaria

EVOLVING A PROTOFEATHER AND FEATHER DIVERSITY. Alan H. Brush, en *American Zoologist*, vol. 40, n.º 4, págs. 631-639; 2000.

RAPID COMMUNICATION: SHH-BMP2 SIGNALING MODULE AND THE EVOLUTIONARY ORIGIN AND DIVERSIFICATION OF FEATHERS. Matthew P. Harris, John F. Fallon y Richard O. Prum, en *Journal of Experimental Zoology*, vol. 294, n.º 2, págs. 160-176; 15 de agosto, 2002.

THE EVOLUTIONARY ORIGIN AND DIVERSIFICATION OF FEATHERS. Richard O. Prum y Alan H. Brush, en *Quarterly Review of Biology*, vol. 77, n.º 3, págs. 261-295; septiembre 2002.

Planetas libres y cúmulos estelares

Los científicos han buscado planetas en lugares exóticos, muy lejos de sus estrellas progenitoras: dentro de los cúmulos de estrellas más densos de la galaxia

Jarrod R. Hurley y Michael M. Shara

La existencia de planetas fuera de nuestro sistema solar ha sido un tema delicado desde que en 1600 el filósofo Giordano Bruno fuera quemado en la hoguera por proponer, entre otras cosas, que en el universo hay un número infinito de mundos. Hoy día, no se quema públicamente a nadie por afirmar que existen planetas extrasolares, pero sigue siendo un tema debatido. Hasta la fecha se han encontrado más de 100 planetas en órbita alrededor de otras estrellas, con gran júbilo de la comunidad astronómica. Pero quizá ha sido mayor la conmoción causada por el descubrimiento de unas pocas docenas de planetas extrasolares que no están ligados a estrella alguna. Pocos descubrimientos de objetos celestes habrán suscitado tal polémica como estos "planetas libres" o "planetas aislados".

El problema reside en la vaguedad del concepto mismo de planeta. Algunos de los objetos hallados alrededor de otras estrellas son mucho mayores que los planetas gigantes de nuestro sistema solar; su masa decuplica con creces la de Júpiter (aunque la mayoría sólo la triplica o cuadriplica). Ese valor se aproxima a la frontera que separa los planetas de otros cuerpos subestelares, las enanas marrones, a las que a menudo se llama "estrellas fallidas" porque son demasiado pequeñas para producir la fusión del hidrógeno en su núcleo. Las enanas marrones tienden el puente entre los planetas y las verdaderas estrellas; los bordes superior e inferior que limitan su reino resultan aún un poco confusos. (Para aumentar la confusión, ¡se ha sugerido no hace mucho que las enanas marrones podrían alojar planetas a su alrededor!)

Por otra parte, algunos de los planetas libres parecen no ser mayores que Júpiter, pero su mera existencia desafía la definición clásica de planeta: objeto subestelar que da vueltas a una estrella, junto a la cual nació. Muchos se oponen a llamar a estos objetos aislados "planetas"; por ahora, algunos los denominan "cuerpos errantes".

Más allá de cuestiones nominales, parte del problema que plantean estos planetas aislados consiste en explicar y comprender sus orígenes. Si se formaron como las estrellas, por el colapso gravitatorio de una nube de gas y polvo, deberían haber nacido junto con estrellas en los cúmulos o asociaciones estelares. Si, por el contrario, nacieron en un disco protoplanetario que rodeaba a una estrella en formación, hay que preguntarse por qué se quedaron huérfanos, tan lejos de su estrella madre.

Investigamos esta última posibilidad. Nos hemos especializado en el estudio de los cúmulos globulares de estrellas; tratamos de saber qué son y cómo evolucionan, por medio tanto de observaciones como de simulaciones por ordenador. Aunque pudiera parecer un campo ajeno al estudio de los planetas extrasolares,

El autor

JARROD HURLEY investiga la evolución de los cúmulos estelares mediante simulaciones por ordenador. Michael Shara dirige el departamento de astrofísica del Museo Americano de Historia Natural, al que Hurley se halla adscrito. Entre sus intereses científicos se cuentan la estructura y evolución de las novas y supernovas, los choques de estrellas y la naturaleza de las poblaciones estelares.



1. EL CUMULO GLOBULAR 47 TUCANAE consta de varios millones de estrellas y de un número desconocido de planetas. Con modelos informáticos de las interacciones dinámicas de estos cúmulos estelares densos se busca resolver si un sistema planetario estable podría sobrevivir a la violenta gravedad de un entorno donde unas 3000 estrellas se apiñan en un año luz cúbico. La búsqueda en el cúmulo 47 Tucanae de planetas jovianos que describan órbitas cercanas a sus estrellas no ha encontrado ni rastro de ellos. ¿Existieron siquiera alguna vez? ¿O se liberaron de sus estrellas progenitoras como resultado de un encuentro con otra estrella? Las respuestas quizás arrojen más luz sobre los recientes descubrimientos de planetas en cúmulos de estrellas jóvenes.

AAO/DAVID MALIN

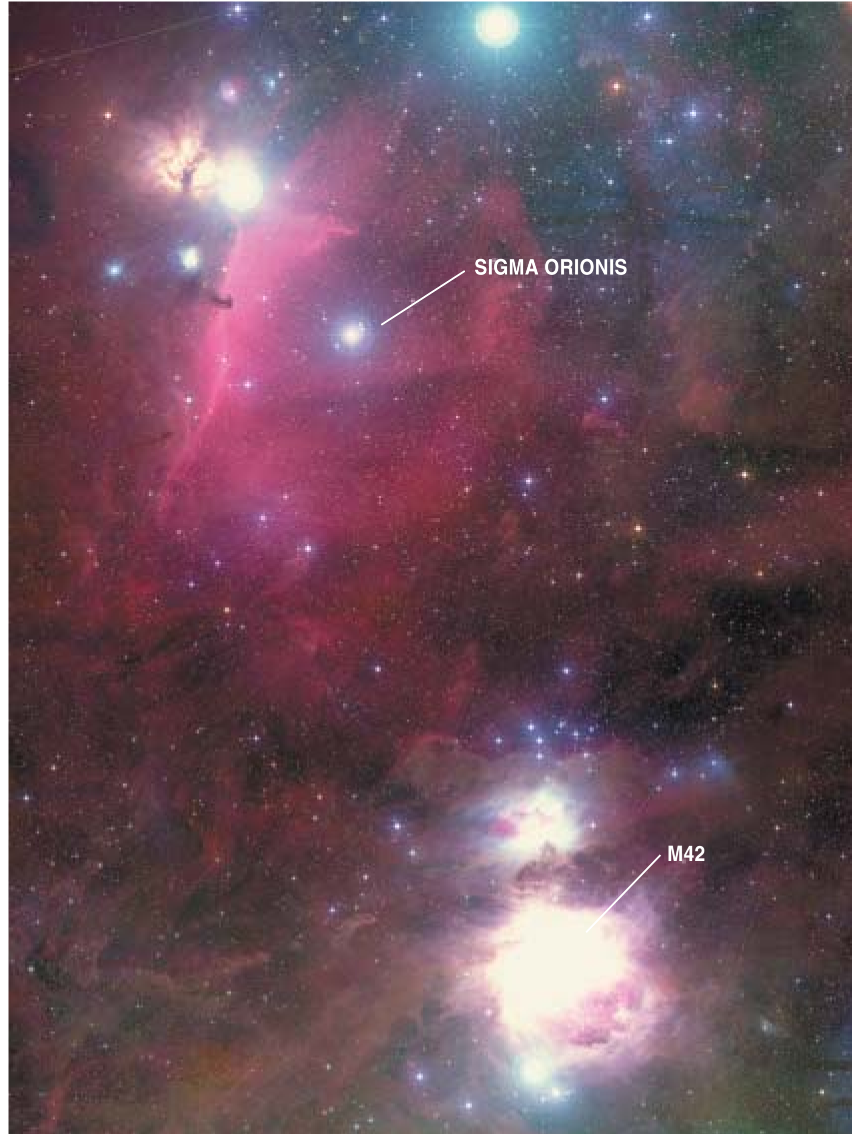
los cúmulos estelares más densos son campos muy fértiles para quienes buscan planetas aislados mediante el análisis de las interacciones dinámicas entre las estrellas. Consideraremos los descubrimientos recientes de planetas libres.

Los "cuerpos errantes"

Los "cuerpos errantes", aparte de su novedad, interesan e importan por sí mismos. El número y la variedad en la Vía Láctea de cuerpos celestes menores que una estrella —menos de 0,08 masas solares (unas 80 masas de Júpiter)—, se desconoce. Han de presentar tamaños varios: desde objetos bastante grandes, como las enanas marrones y los planetas gaseosos gigantes, hasta los planetas rocosos, la Tierra entre ellos, y cuerpos menores, así los satélites y asteroides de nuestro sistema solar. Lo cuantitativo no sólo importa en nuestra búsqueda de mundos habitables y con vida extraterrestre; sólo con ella podrán resolverse problemas fundamentales —el número y tamaño relativos de las estrellas recién formadas en un cúmulo (la "función inicial de masas") y la identidad de la materia oscura del universo.

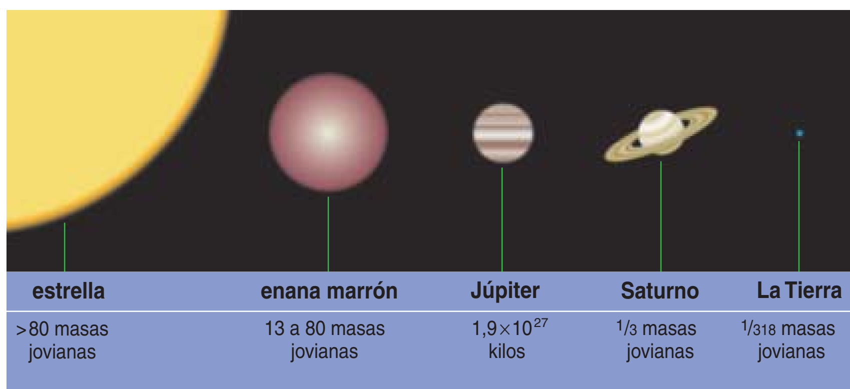
Con el acicate de estas preguntas, varios grupos emprendieron la busca de otros mundos a principios del decenio de 1990. Sus esfuerzos han conducido a una serie de descubrimientos sorprendentes, que se iniciaron con la primera detección de un planeta extrasolar en 1992. El astro orbitaba alrededor de una estrella muerta, en concreto de un púlsar, una estrella de neutrones que gira muy rápido y emite con intensidad ondas de radio. Nadie esperaba que los púlsares cobijaran planetas; la supernova que dio lugar a la estrella de neutrones debería haber destruido cualquier planeta de los alrededores.

Se encontraron más planetas extrasolares que giraban alrededor de estrellas convencionales en 1995, pero también se trataba de sistemas peculiares. Muchos tienen planetas



AAO-ROE/DAVID MALIN

2. LAS INCUBADORAS ESTELARES DE ORION, hogar de miles de estrellas recién formadas, parecen albergar planetas aislados. Se han encontrado objetos de éstos en las regiones de formación estelar del Trapecio, en la Nebulosa de Orión (M42) y cerca de la estrella brillante sigma Orionis. Se han hallado casi 40 objetos aislados de tamaño planetario.



3. LA DEFINICION DE PLANETA depende en parte de la masa. El descubrimiento de objetos aislados de menos de 13 veces la masa de Júpiter (el límite inferior de las enanas marrones) ha suscitado un debate acerca de su origen y identidad. Los cuerpos aislados más pequeños hasta ahora encontrados tienen alrededor de 3 masas jovianas. A las limitaciones técnicas actuales cabría atribuir la aparente carencia de cuerpos de menor tamaño, aunque la teoría también parece indicar que realmente son escasos. Por ahora se desconoce su abundancia.

del tamaño de Júpiter en órbitas muy pequeñas (de menos de 5 días). Estos jovianos calientes no encuentran explicación en los modelos actuales de formación de los sistemas planetarios, ya que sitúan esos gigantes de gas a grandes distancias de la estrella central, con períodos orbitales más parecidos al de Júpiter, que es de casi 12 años.

Con tantas sorpresas como estos “sistemas solares” habían dado, debería haberse esperado que los mundos aislados ofreciesen también las suyas. Resulta curioso, habida cuenta de la barahúnda que hoy rodea a los “cuerpos errantes”, que el primer descubrimiento, en 1998, se anunciase sin el menor entusiasmo. En un artículo sobre enanas marrones jóvenes publicado por Motohide Tamura, del Observatorio Astronómico Nacional de Japón, y sus colaboradores, se hacía una breve mención; decían que algunos de los objetos que se habían observado caían por debajo de la frontera de las enanas marrones (unas 13 masas jovianas) y, por tanto, dentro del “régimen de masa de los planetas gigantes”. El límite de 13 veces la masa de Júpiter marca la frontera a partir de la cual un objeto comienza a quemar deuterio (un isótopo del hidrógeno); en consecuencia, se lo considera la cota inferior del dominio de las enanas marrones. Por la modestia de los científicos japoneses, su descubrimiento no trascendió durante un par de años.

Tamura y sus colaboradores encontraron estos cuerpos de tamaño planetario mientras buscaban objetos estelares jóvenes, de masa pequeña, en las nubes moleculares de Camaleón I, una región donde abunda la creación de estrellas. A estas alturas, no puede extrañar que los primeros planetas aislados se hallasen en una de esas regiones. Puesto que los planetas jóvenes aún retienen parte del calor generado durante el proceso de agregación que los origina, se reconoce su brillo caliente con los mismos detectores infrarrojos con que se observan las enanas marrones y las estrellas muy jóvenes.

Investigaciones parecidas, de astros de poca masa situados en regiones de formación estelar, descubrieron nuevos cuerpos sueltos de

tamaño planetario en 2000. En la primavera de ese año dos británicos, Philip Lucas y Patrick Roche, anunciaron el hallazgo de otros 13 posibles objetos de ese tipo en el corazón de la Nebulosa de Orión (M42), una región de formación estelar, a unos 1500 años luz de la Tierra. Varios de estos objetos, comunicaron, no llegaban a tener 13 veces la masa de Júpiter. Al igual que en los estudios de Tamura, la identidad de esos objetos depende de su edad. Si son muy jóvenes, de sólo un millón de años, su brillo (luminosidad) se acercará al de unos objetos del tamaño de los planetas gigantes.

Algunos cuestionaron el descubrimiento de Lucas y Roche; sostenían que los cuerpos descubiertos poseían un brillo intrínseco superior al que aparentan. Se encontraban detrás de la Nebulosa de Orión; por eso parecían planetas jóvenes: los debilitaba el polvo de la nebulosa. En tal caso habría que considerarlos enanas marrones. Otros se preguntaron si, fuera como fuese, tenía sentido llamarlos planetas. Alan Boss, del Instituto Carnegie, cree que la masa no debería ser la característica que defina a los planetas, sino más bien la forma en la que se crean —dentro de un disco protoplanetario y alrededor de una estrella joven—. Boss ha expuesto un mecanismo que crearía objetos de masa planetaria de manera parecida a como nacen las estrellas. No se trataría de planetas, sino de "subenanas marrones".

Poco después de los descubrimientos de Lucas y Roche, un segundo grupo de astrónomos anunció la detección de planetas aislados en otra parte de la constelación de Orión. María Rosa Zapatero Osorio y sus colaboradores descubrieron 18 "cuerpos errantes", débiles y rojos, en imágenes de larga exposición de un cúmulo, cerca de la estrella sigma Orionis (*véase la figura 2*). Esta región está situada a escasos 1000 años luz de distancia de la Tierra y es el hogar de estrellas recién formadas, con edades entre uno y cinco millones de años. Entre las estrellas jóvenes existe un número de objetos con temperaturas muy bajas, entre 1700 y 2000 kelvin (la temperatura de la atmósfera del Sol es de 5800 kelvin). Por su edad y temperaturas frías, se piensa que son objetos muy "pequeños", con masas entre 5 y 15 veces la de Júpiter. Los autores fueron bastante cautos a la hora de resolver la identidad de tales objetos; en el título de su artículo los denominaban "objetos jóvenes, aislados y de masa planetaria".

Luego, en otoño de 2001, Lucas, Roche y sus colaboradores anunciaron nuevas observaciones que confirmaban la existencia de "cuerpos errantes" dentro de la Nebulosa de Orión; por tanto, deben tener tamaño planetario. Sus estudios espectroscópicos indican la presencia de vapor de agua, lo que apoya la juventud de los objetos (alrededor de un millón de años) y su baja masa. Creen haber identificado quince objetos aislados de masa planetaria. Con la esperanza de evitar conflictos por cuestiones nominales, acuñaron un nuevo término para designar los objetos planetarios que no giran alrededor de ninguna estrella: "planetares".



4. EL ORDENADOR GRAPE-6 se ha diseñado pensando en el enorme número de operaciones necesarias para construir un modelo informático de las interacciones dinámicas dentro de un cúmulo estelar denso. Las aplicaciones de GRAPE-6 son limitadas: parte de la lógica de las interacciones estelares está integrada en los chips. Hemos utilizado el prototipo mostrado en la figura para obtener los resultados presentados en el artículo. Ejecuta medio billón de operaciones de punto flotante (0,5 teraflop). Es la potencia necesaria para seguir, en nuestra simulación de N cuerpos, la vida de unas 10.000 partículas (estrellas y planetas) dentro de un cúmulo abierto. La versión actual de GRAPE-6 llega a 1 teraflop, suficiente para unas 100.000 partículas.

JARROD R. HURLEY Y MICHAEL M. SHARA

El hilo común de todos estos descubrimientos es el hallazgo de objetos aislados dentro de grupos de estrellas de reciente formación. Las estrellas de estos grupos se dispersarán con el tiempo, bien porque no estén gravitatoriamente ligadas entre sí (asociaciones dispersas), bien porque los cúmulos sean lo bastante pequeños (es decir, porque se trate de cúmulos abiertos) como para que los diezmen las fuerzas de marea de la galaxia en sólo unos miles de millones de años. Excepto las que formen sistemas estelares múltiples, estas estrellas "de campo" vagarán solas por la galaxia, tal y como hace el Sol. Es razonable pensar que los objetos aislados de tamaño planetario nacidos dentro del cúmulo abierto se dispersan con las mareas. Una vez hayan abandonado su cuna, serán mundos muy fríos, oscuros y solitarios, harto difíciles de detectar.

¿Cuerpos errantes en los cúmulos globulares?

Existen otros lugares donde podemos encontrar planetas aislados: en los muy densos confines estelares de los cúmulos globulares. Al contrario de lo que ocurre en las asociaciones jóvenes de estrellas, los cúmulos globulares contienen estrellas gravitatoriamente vinculadas entre sí. Son muy antiguos: algunos pasan de los diez mil millones de años. Dadas las diferencias entre estos dos ambientes, parece extraño pensar que en los dos pueda haber planetas libres. Y, sin embargo, así es.

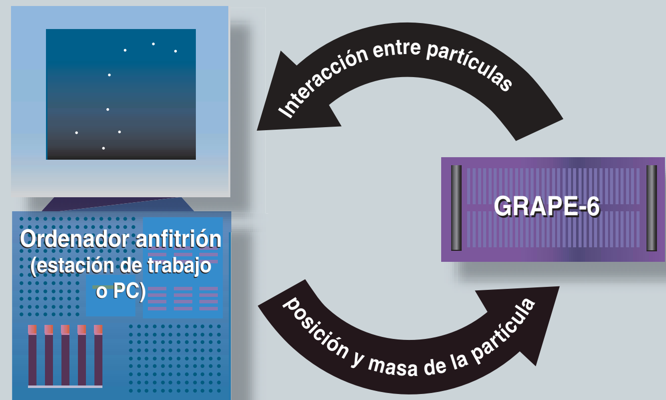
La primera búsqueda de planetas en un cúmulo globular no tuvo en cuenta los planetas aislados. En ju-

El cúmulo globular, en el ordenador

Una simulación de N cuerpos de un cúmulo globular se ejecuta mediante un diálogo entre una máquina anfitriona —que mantiene en memoria las posiciones y las masas de las partículas— y GRAPE-6 —un ordenador construido expresamente para calcular las interacciones entre las partículas—. El proceso comienza definiendo las características del sistema: los tamaños relativos y el número de estrellas (la función inicial de masas), el número de sistemas binarios y planetas, las posiciones y velocidades iniciales de las estrellas, sus densidades, distribución y equilibrio virial (que define la cantidad total de energía dentro del cúmulo).

Durante el cálculo, se siguen dos parámetros temporales de cada estrella: uno para su evolución física (t_{evol}) y otro para sus interacciones dinámicas (t_{din}). Los intervalos de tiempo son diferentes para cada estrella. Las estrellas de masa grande evolucionan rápido y, por tanto, tienen tiempos t_{evol} cortos, mientras que las estrellas de baja masa evolucionan despacio y sus tiempos t_{evol} son más largos. De forma análoga, las estrellas de movimiento rápido dentro del núcleo denso del cúmulo tienen tiempos t_{din} cortos, mientras que las estrellas, más lentas, de las regiones externas tienen tiempos t_{din} largos.

El sistema se actualiza por bloques de partículas con tiempos t_{din} similares. La evolución física de una estrella de desarrollo rápido se actualiza más de una vez en cada paso de la evolución dinámica (si $t_{evol} < t_{din}$). Se realizan comprobaciones cada cierto tiempo arbitrario (t_{arb}) con el fin de verificar que no se han cometido "violaciones" de la física. Las partículas que emigran hacia las regiones exteriores del cúmulo globular se eliminan del sistema; simula la evaporación del cúmulo debido a las mareas galácticas. También se toman en cuenta durante los cálculos otros procesos astrofísicos (*véase la figura 5*).



INICIALIZACION

Función inicial de masas (0,1 a 100 masas solares)

¿Planetas y enanas marrones?

Estrellas binarias: proporciones, órbitas y masas

Masas estelares

Densidad, distribución y equilibrio virial

Posición de la estrella y velocidad

Cúmulo a $t = 0$

INTEGRACION

Envío de masas, posiciones y velocidades de todas las partículas (estrellas y planetas) a la memoria de GRAPE

Actualización de la evolución estelar para partículas con $t_{evol} < t$

¿Pérdida de masa o transferencia de masa?

Correción de fuerzas sobre partículas cercanas

integración del siguiente bloque de partículas (t_{din} mínimo)

Predicción de posiciones y velocidades en el ordenador anfitrión

Cálculo de fuerzas en GRAPE

Corrección de posiciones y velocidades en el ordenador anfitrión

Comprobación de formación/destrucción de binarias o choques

Actualización de posiciones y velocidades

$t = t_{din}$

Si $t < t_{arb}$

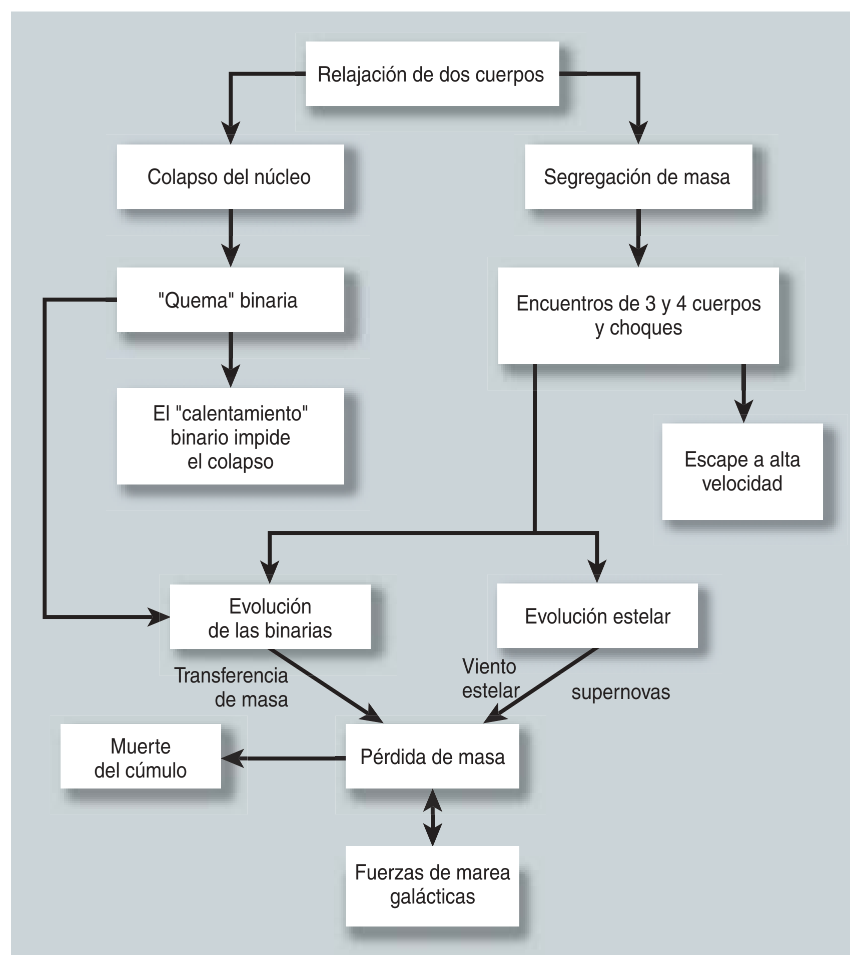
Comprobación de la conservación de energía

Eliminación de partículas fuera del entorno

lio de 1999, Ronald Gilliland y sus colaboradores observaron cerca de 34.000 estrellas del cúmulo globular 47 Tucanae con la Cámara Planetaria de Gran Campo número 2 del Telescopio Espacial Hubble. Este cúmulo es uno de los mayores y más densos de nuestra galaxia; debe sumar varios millones de estrellas (*véase la figura 1*). El núcleo es tan denso, que residen allí unas 3000 estrellas por año luz cúbico. Algunos cúmulos globulares tienen núcleos con casi tres millones de estrellas por año luz cúbico. Por comparación: en un año luz cúbico centrado en el Sol, sólo hay una estrella, el propio Sol; la estrella más próxima a éste se halla a más de cuatro años luz de distancia. Puesto que 47 Tucanae es bastante viejo, el equipo de Gilliland pensó que su proyecto podría arrojar nueva luz sobre los sistemas planetarios de estrellas envejecidas.

La misión del telescopio espacial consistía en detectar los tránsitos de planetas del estilo de Júpiter calientes por delante de sus estrellas progenitoras. Percibimos esos pasos porque la luz de la estrella se debilita un poco al cruzarse el planeta. Por consideraciones teóricas, basadas en la frecuencia de esos planetas calientes en la vecindad del Sol, se esperaba encontrar una veintena de ellos en 47 Tucanae, más o menos uno por cada 1700 estrellas. Terminada la tarea, no se observó ninguno.

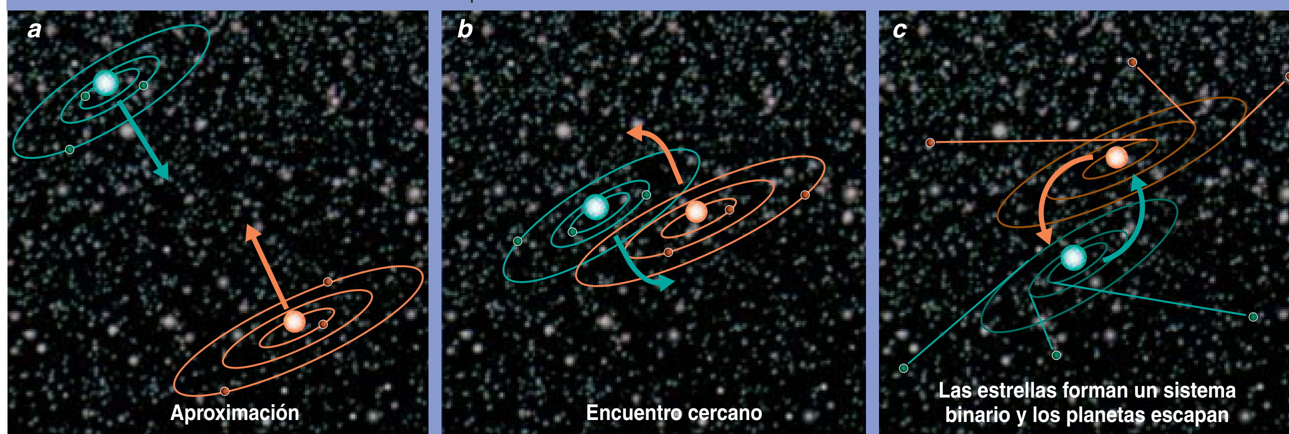
Hay dos explicaciones posibles. Una de ellas se basa en la relación aparente entre la composición química de una estrella y su predilección por los planetas calientes. En la búsqueda de planetas extrasolares en la vecindad solar, se ha descubierto lo siguiente: resulta, al menos, diez veces más probable que las estrellas ricas en metales (con abundancias bastante altas de elementos más pesados que el helio) tengan planetas con períodos orbitales cortos que las estrellas pobres en metales. Mientras se resuelve el motivo, aquí sólo necesitamos apuntar que las estrellas viejas de 47 Tucanae son, en general, deficientes en metales (cuentan aproximadamente con un quinto de la metalicidad solar), ya que se formaron al principio de la historia de



5. AL ELABORAR UN MODELO DE LA EVOLUCION de un cúmulo globular se tienen en cuenta varios procesos astrofísicos. La relajación de dos cuerpos consiste en intercambiar energía entre las estrellas de manera que tiendan a tener la misma cantidad de ella: las estrellas pesadas se frenan y viajan hacia el núcleo del cúmulo; las más livianas se aceleran y emigran hacia regiones exteriores. Esta segregación de masas afecta al ritmo de los encuentros entre las estrellas y suele acelerar a las más pequeñas hasta que alcanzan la velocidad de escape. A medida que las estrellas pesadas se agrupan, la densidad del centro del cúmulo aumenta, lo que multiplica el número de encuentros y choques ("calentamiento" binario) que retrasan el colapso del núcleo. La "quema" binaria estrecha aún más las binarias ceñidas y rompe aquellas donde la distancia entre el par de astros era mayor (incluyendo a los sistemas planetarios). Estos procesos afectan a la evolución de los sistemas múltiples y de las estrellas. La transferencia ineficaz de masa entre las estrellas múltiples provoca una pérdida de materia. Las estrellas individuales también pueden perder masa: las de mayor masa explotan como supernovas, mientras que las no tan grandes pierden masa constantemente en forma de vientos estelares. Las fuerzas de marea gravitatorias de la galaxia extraen esa masa del cúmulo junto con las estrellas pequeñas que se han desplazado hasta las regiones exteriores. El cúmulo desaparece cuando todas sus estrellas se han dispersado, bien barridas por las mareas gravitatorias, bien por la expulsión directa. En medio de este agitado ambiente, la creación de planetas libres podría ser frecuente.

la galaxia, antes de que los elementos químicos pesados se hubieran sintetizado en grandes cantidades. Resulta interesante que se haya encontrado un planeta extrasolar alrededor de un púlsar del cúmulo globular M4.

Pero cabe otra explicación posible. El entorno de un cúmulo denso inhibe la formación de planetas o





6. HAY DOS MECANISMOS HIPOTETICOS que pueden engendrar objetos aislados de masa planetaria. En un cúmulo estelar denso (*a*), el encuentro entre dos sistemas planetarios (*b*) quizá libere a algunos planetas (*c*). En este ejemplo, tras el encuentro se ha formado un sistema estelar binario. En la mayoría de los casos, un pequeño impulso impartido por una estrella que se acerca bastaría para liberar los planetas. Pueden originarse objetos de tamaño planetario a partir también de una nube molecular (*d*), de manera muy parecida a como nace cualquier estrella. Si estos objetos se crean en un sistema dinámicamente inestable (*e*), escaparán (*f*) y no permanecerán ligados a la estrella.

limita la migración orbital de los gigantes de gas hacia sus estrellas progenitoras. Puede, también, que los sistemas planetarios se engendren dentro de cúmulos globulares y que las colisiones con estrellas vecinas, habida cuenta de la alta densidad del cúmulo, los disuelvan pronto. De ser así, los planetas de estos sistemas que colisionan se liberarían de sus estrellas progenitoras. Puesto que el equipo de Gilliland sólo buscaba tránsitos de planetas calientes, no localizó ninguno.

Un artículo aparecido en el verano de 2001 anunció la detección, gracias a las microlentes gravitatorias, de algunos posibles planetas libres en el cúmulo globular M22. Resultó, no obstante, que unos rayos cósmicos habían caído sobre la cámara; hicieron creer a los astrónomos que habían descubierto planetas.

¿Adónde han ido a parar los planetas?

¿Qué nos está diciendo la detección nula de planetas en el cúmulo globular 47 Tucanae? Debemos primero tener en cuenta que la vida de un planeta dentro de un cúmulo globular podría ser muy diferente de la vida de un planeta alrededor de una estrella en un entorno menos denso. Los encuentros y los choques directos entre estrellas de regiones muy pobladas deben afectar a la integridad de los sistemas planetarios. Con los resultados de 47 Tucanae en mente, varios astrofísicos, entre ellos nosotros, han construido modelos informáticos de sistemas planetarios sitos en entornos así.

Primero debemos crear una copia razonable de un cúmulo globular. Es una tarea ardua. Existen varias formas de construir un modelo de cúmulo estelar; nosotros hemos optado por seguir el comportamiento de cada estrella en una simulación de N cuerpos. La inmensa cantidad de estrellas dentro de un cúmulo globular hace que esta tarea sea todo un desafío computacional. En la práctica, no podemos abordar la interacción de millones de estrellas. Nuestras simulaciones actuales sólo incluyen unas 10.000 estrellas. Aun así, los cálculos requieren de un equipo diseñado específicamente para este solo propósito. La gene-

ración más reciente de estas supercomputadoras es GRAPE-6 (del inglés “GRAvity PipE”), una máquina poderosa, capaz de realizar un teraflop (un billón de operaciones de punto flotante por segundo), creada por Jun Makino y su equipo de la Universidad de Tokio. Hemos utilizado un prototipo que opera a 0,5 teraflop para obtener los resultados presentados aquí (*véase la figura 4*).

Además de un equipo material específico, se necesitan programas muy refinados para los modelos de los procesos que ocurren dentro de un cúmulo estelar. Sverre Aarseth lleva treinta años ofreciendo los más avanzados algoritmos de N cuerpos. Ha elaborado con sus colaboradores una serie de códigos, cada vez más eficaces y realistas, de N cuerpos. El código NBODY4 de Aarseth, el que hemos utilizado en nuestras simulaciones, se concibió para las máquinas GRAPE.

Hay que fijar las condiciones iniciales del cúmulo globular: masas, metalicidades estelares, número de sistemas estelares binarios y sus características orbitales, número de planetas y la distribución de la densidad estelar. Las masas, posiciones y velocidades de las estrellas del cúmulo vienen determinadas por una condición: que el cúmulo empiece en un *equilibrio virial*. Se trata de una propiedad general de los sistemas ligados: el valor absoluto de la energía potencial del cúmulo duplica la energía cinética del sistema. Queda definido así el cúmulo en una “edad cero” en la que todas las estrellas ya estaban formadas y no había gas residual.

Una vez se ha descrito el sistema, las partículas (estrellas y planetas) interaccionan conforme a la física newtoniana —se calcula la fuerza sobre cada partícula y corrige su posición y velocidad en la siguiente fracción del tiempo—; también hay que tener en cuenta la evolución de las estrellas sueltas y de las binarias.

Ese devenir tiene lugar en el contexto de varios procesos astrofísicos que se incluyen en los cálculos (*véase la figura 5*). Así, consideramos la evolución del cúmulo mismo, con el desplome que sufre su centro (el aumento progresivo de la densidad del núcleo central) a medida que el cúmulo pierde estrellas (se evaporan) debido a las fuerzas de marea de la galaxia. Creemos que este esquema nos proporciona una imagen de qué les va ocurriendo a los cúmulos globulares de cientos, miles o millones de estrellas.

Ejecutamos tres simulaciones con 22.000 estrellas del cúmulo y de 2000 a 3000 planetas del tamaño de Júpiter. (El 10 % de las estrellas eran sistemas binarios.) Las simulaciones diferían entre sí, ligeramente, en la metalicidad y en la separación orbital de planetas y estrellas progenitoras. Cada simulación evolucionó hasta una edad de 4500 millones de años, la de nuestro sistema solar.

La suerte de los planetas, cada uno ligado originalmente a su estrella, fue dispar. Después de 4000 millones de años —cuando sólo quedaba un 25 % de la masa total inicial del cúmulo—, el 10 % de los planetas se había liberado de sus estrellas progenitoras; de ese 10 %, un 13 % aún permanecía dentro del cúmulo. Casi el 66 % de los planetas abandonaron el cúmulo sin dejar de orbitar alrededor de sus estrellas; un 1 %, más o menos, fue tragado por su estrella progenitora; un 4 % pasó a girar alrededor de otra estrella.

Los resultados también muestran que los planetas en órbitas grandes —a unas 50 unidades astronómicas de sus estrellas centrales (una unidad astronómica es la distancia media entre el Sol y la Tierra)— tienen una probabilidad 10 veces mayor de separarse de sus estrellas que los planetas que orbitan a tan sólo una unidad astronómica. Aunque los planetas se liberan sobre todo en el núcleo denso del cúmulo, casi la mitad se desprende con una velocidad inferior a la velocidad de escape del cúmulo; es decir, la mayoría de los “cuerpos errantes” se convierten en huérfanos en el seno del cúmulo y se difunden lentamente hacia las regiones más externas. Dentro del cúmulo, la posición media de los planetas libres cae justo más allá del radio de semimasa (el radio en cuyo intervalo reside la mitad de la masa del cúmulo). Los planetas tardan unos 200 millones de años en sobrepasar, partiendo del centro, el radio de masa media del cúmulo.

Entre los sistemas planetarios que escapan del cúmulo globular, la mayoría es arrastrada por el campo de marea galáctico que barre las estrellas de las regiones externas del cúmulo. Un número menor de estrellas y planetas son expulsados del cúmulo cuando alcanzan la velocidad de escape tras haber sufrido encuentros con otras estrellas, si bien la mayoría de esas aproximaciones terminan en la liberación de un planeta, no en la expulsión del cúmulo.

Estos resultados dan a entender que los cúmulos globulares podrían conservar un buen número de objetos aislados del tamaño de Júpiter incluso después de miles de millones de años de choques y encuentros estelares.

Todavía es demasiado pronto para comprender el alcance de los resultados del estudio de 47 Tucanae. Se ha sugerido últimamente que las futuras exploraciones en busca de sistemas planetarios se realicen en cúmulos menos densos que 47 Tucanae, en cúmulos abiertos ricos en metales. Por ahora, no está claro si la carencia de planetas calientes en 47 Tucanae obedece a su baja metalicidad o a las interacciones dinámicas desarrolladas en su interior.

Bibliografía complementaria

PLANETS IN 47 TUC. M. B. Davies y S. Sigurdsson, en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 324, págs. 612-616; 2001.

FREE-FLOATING PLANETS IN STELLAR CLUSTERS? K. W. Smith e I. A. Bonnell, en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 322, págs. L1-L4; 2001.

FREE-FLOATING PLANETS: NOT SO SURPRISING. R. J. Hurley y M. M. Shara, en *The Astrophysical Journal*, vol. 565, págs. 1251-1256; 2002.

A RE-EXAMINATION OF THE ‘PLANETARY’ LENSING EVENTS IN M22. K. C. Sahu, J. Anderson e I. R. King, en *The Astrophysical Journal*, vol. 565, págs. L21-L24; 2002.

THE GRAVITATIONAL MILLION-BODY PROBLEM. D. C. Heggie y P. Hut. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

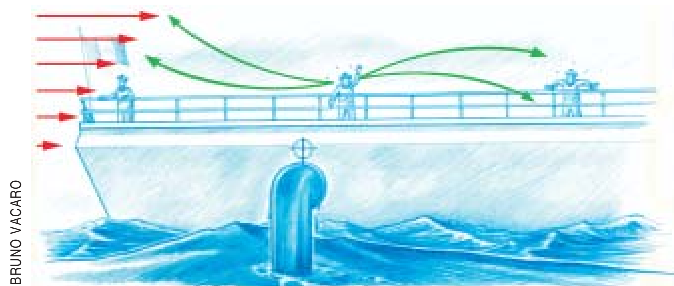
Espejismos acústicos

Sumergiéndose a la profundidad adecuada, consiguen las ballenas hacerse oír a miles de kilómetros y los submarinos ocultarse del sonar. Cetáceos y submarinos aprovechan el equivalente acústico de los espejismos ópticos. Para explicarlo, hablaremos primero de la propagación del sonido y, luego, demostraremos que los espejismos acústicos son una de las múltiples manifestaciones de un mismo fenómeno: la desviación de las ondas sonoras hacia las zonas donde su velocidad de propagación es más baja.

La propagación del sonido

El sonido consiste en unas variaciones de presión muy rápidas creadas por una perturbación; cuando hablamos, nuestras cuerdas vocales ponen en movimiento el aire que las rodea. Como el aire es elástico, cada una de sus capas se comporta como un resorte. Cada capa de aire comprimido se distiende y comprime la capa siguiente en el sentido de la propagación, etc. La mayoría de los medios (gaseosos, líquidos, sólidos) son lo bastante elásticos para transmitir así los sonidos. Cuando el medio es homogéneo, las ondas sonoras se desplazan en su seno en línea recta y a una velocidad que depende de qué medio se trate; por ejemplo, en el aire, a 20 ºC, avanzan a 340 metros por segundo, mientras que en el agua rozan los 1500 metros por segundo.

En cambio, en los medios no isótropos las trayectorias de las ondas sonoras se curvan. De ahí los espejismos acústicos. Ocurre cuando sopla el viento. Casi inmóvil a ras de tierra, el aire es tanto más rápido cuanto mayor es la altura. Para entender el efecto de esa distribución de velocidades sobre el sonido, pensemos en qué pasa cuando se remonta un río en barca. Hay que acercarla a la orilla, donde la corriente es débil. No pasará nada mientras no ladeemos el esquife hacia el centro del río. Si cometemos ese error, la trayectoria de la barca se curvará hasta devolvernos a la corriente. ¿Por qué? Porque la popa seguirá estando dentro de las líneas de corriente lentas de la orilla, mientras la corriente rápida del centro del río impulsa la proa. La barca girará sobre su eje y la trayectoria se curvará. Al revés, cuando la barca se mueva a favor de la corriente (siempre cerca de la orilla), la corriente devolverá automáticamente hacia la ribera la proa de la barca si ésta se desvía hacia las zonas de corriente fuerte.



1. El viento curva hacia arriba el trayecto de las ondas acústicas que viajan en sentido contrario; hacia abajo, las que se propagan en su mismo sentido

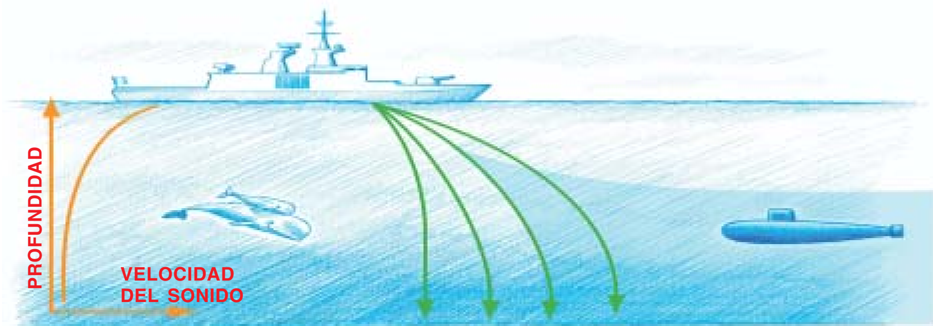
Los efectos de la velocidad del viento sobre una onda sonora son análogos. Como una barca en la corriente, el sonido puede ser frenado o, por el contrario, arrastrado por una corriente de aire. Sin embargo, la variación de su velocidad no es exagerada, pues la velocidad del viento es pequeña con relación a la del sonido: un viento de 100 kilómetros por hora (muy raro), corresponde a menos de 30 metros por segundo, o sea, apenas un diez por ciento de la velocidad del sonido. Como la barca, el sonido es también desviado por las corrientes de aire. Cuando hablamos a favor del viento, el sonido se abate hacia el suelo y nuestra voz llega lejos; cuando hablamos contra el viento, el sonido se eleva hacia el cielo y nuestra voz se pierde.

Sonido y temperatura

Así pues, en los medios donde su velocidad de propagación no es uniforme, el sonido se desvía, de tal modo que las ondas sonoras se tuercen hacia las zonas donde más despacio se propague. Este fenómeno se llama refracción; aparte del viento, en la refracción del sonido influyen dos magnitudes, la presión y la temperatura. La velocidad del sonido crece del orden de 0,6 metros por segundo y grado Celsius; de ahí que dependa de la altitud, ya que la temperatura varía con esta última. Generalmente, el aire se enfría a medida que subimos; la velocidad del sonido es menor en las alturas que cerca del suelo. La situación es entonces análoga a la observada cuando hablamos contra el viento; o sea, el sonido se desvía hacia arriba. Este efecto se amplifica con las tormentas, en que el aire próximo al suelo está muy caliente y, por ello, la temperatura disminuye fuertemente con la altitud. En tales casos, la refracción es tan grande que no se oye el tronar de las tormentas que estallen a sólo unos pocos kilómetros de distancia y todo ocurre cual si estuviéramos en una zona de "oscuridad sónica". El efecto inverso se da cuando el aire del suelo está más frío que en las alturas y, así, en las frías noches invernales, un *Smart* que atraviese la campiña rugirá como un *Ferrari*.

Cuando la temperatura del aire crece con la altitud, aparecen unos efectos sorprendentes. Por ejemplo, las salvas disparadas en el entierro de la reina Victoria se oyeron en Escocia, pero no en Inglaterra. Aquel día, el aire estaba caliente cerca del suelo, frío en las altitu-

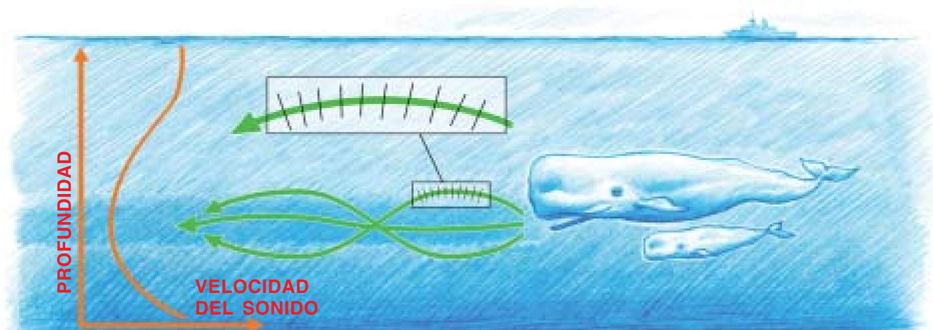
des medias, y otra vez caliente más arriba. Una vez llegaban a la capa fría, las ondas sonoras permanecían en ella más tiempo; allí las devolvían las capas más calientes que la limitaban. Sólo en Escocia, distante más de 400 kilómetros, se refractaron hacia el suelo y fueron oídas.



2. En el mar se crean zonas de sombra acústica cuando las capas superiores están calientes. Situados a la profundidad donde es máxima la velocidad de propagación de las ondas sonoras, los submarinos se ocultan de los sonares enemigos

Espejismos oceánicos

Fenómeno raro en la atmósfera, la refracción de las ondas sonoras es menos excepcional en los océanos. La primera indicación de su existencia se remonta al inicio de la Segunda Guerra Mundial, cuando numerosos barcos de guerra americanos se equiparon con sonares para detectar submarinos. En el curso de los ensayos en aguas de Guantánamo, los militares advirtieron que los sonares perdían mucha de su eficacia, si no toda, durante el mediodía. Les era difícil detectar un submarino y aún más localizarlo, salvo que se encontrara exactamente debajo de ellos. Los físicos cuya ayuda se recabó no tardaron en descubrir que la explicación del misterioso "efecto del mediodía" estaba en la refracción de las ondas sonoras. Como en el aire, el sonido se propaga más rápido en las zonas de agua caliente que en las zonas de agua fría. Ahora bien, entre la mañana y el mediodía, la temperatura de los primeros metros del mar aumenta algunos grados, mientras que la de las capas profundas varía poco. Al ser la velocidad del sonido mayor en la superficie, los impulsos acústicos del sonar se desviaban fuertemente hacia abajo durante los mediodías y sólo sondeaban las cercanías más inmediatas del barco emisor.



3. A 1000 metros de profundidad existe una capa de agua llamada sofar, donde la velocidad de propagación del sonido es mínima. Esa capa canaliza las ondas sonoras como una fibra óptica la luz. Las ballenas emplean el sofar para comunicarse a grandes distancias

Para no ser detectados, los submarinos deben patrullar a la profundidad donde es máxima la velocidad del sonido, de modo que el sonido que emiten sea desviado hacia la superficie (por encima de ellos) o hacia el fondo, es decir, hacia las zonas donde menor es la velocidad de propagación. Una profundidad correcta garantiza a un submarinista que no se le oirá a los lejos.

Las capas de agua donde es mínima la velocidad del sonido producen los efectos contrarios; o sea, garantizan que se le oirá de lejos, como fue el caso de los cañones de la reina Victoria. Una onda que se dirija hacia arriba se refracta hacia abajo en cuanto llega a las capas superiores donde la velocidad del sonido es mayor; y al revés, se refracta hacia arriba cuando se dirige hacia abajo, pues entonces se encuentra con las capas inferiores donde la velocidad del sonido es también mayor. Ese canal, llamado sofar, existe en todos los océanos del mundo. Fue descubierto en 1943 por el físico norteamericano Maurice Ewing durante sus experiencias precursoras sobre la propagación del sonido bajo el agua. Con un hidrófono situado a unos 1000 metros de profundidad no lejos de las costas africanas, captaba los ruidos de explosiones submarinas procedentes de las islas Bahamas, distantes más de 5000 kilómetros.

¿Por qué la velocidad del sonido es mínima a esa profundidad? La temperatura de las aguas decrece entre la superficie y esa zona, lo que rebaja la velocidad del sonido a un valor mínimo, porque, por debajo de 1000 metros, el efecto de la presión se hace predominante y la velocidad del sonido aumenta con la profundidad. Durante la guerra fría, la marina norteamericana situó micrófonos en el sofar para escudriñar los mares. Después, facilitó a los oceanógrafos el acceso a esa capa privilegiada, lo que les permitió escuchar y estudiar el canto de ballenas de todas las especies que nadaban a miles de kilómetros de distancia. Siguiendo el desplazamiento de las ballenas azules en el Atlántico Norte, los biólogos marinos han observado, entre otras cosas, que estos cetáceos gigantes zigzaguean entre las montañas submarinas, que distan unas de otras varios centenares de kilómetros. Sugiere ello que las ballenas cantan no sólo para comunicarse con sus semejantes, sino también para orientarse. Gracias a los ecos que provocan, saben situarse sobre el mapa del fondo oceánico que han memorizado.

BRUNO VACARO

Juan M. R. Parrondo

El examen inesperado y la teoría de juegos

Hace cuarenta años, en marzo de 1963, Martin Gardner describió en esta misma sección de *Scientific American* una célebre paradoja. Un profesor anuncia a sus alumnos que pondrá un examen a las doce en punto de un día de la semana siguiente de manera completamente inesperada, es decir, los alumnos no sabrán el día en que va a realizarse hasta que el profesor lo anuncie a las doce del día elegido. Los estudiantes se van al bar de la facultad y, tras media hora de discusión, brindan convencidos de que es imposible que el profesor logre su propósito. Se han dado cuenta de que el viernes no puede ser el día elegido porque, en ese caso, el jueves por la noche sabrían con certeza que el examen iba a ser el viernes y, por tanto, no sería inesperado. Una vez eliminado el viernes como día del examen, el argumento se puede aplicar al jueves: como es completamente imposible que el examen tenga lugar el viernes, si en los tres primeros días de la semana aún no ha habido examen, entonces el miércoles por la noche los alumnos sabrán con certeza que va a realizarse el jueves, y dejaría de nuevo de ser inesperado. El argumento se puede repetir hasta el domingo por la noche, día en el que los alumnos estarían seguros de que el examen debe ocurrir en la mañana del lunes. La conclusión final es que las condiciones que el profesor ha impuesto al examen son contradictorias: no puede tener lugar durante la semana y ser inesperado. Los alumnos se van felices a casa y no estudian durante el fin de semana. Sin embargo, el martes de la semana siguiente el profesor, a las doce en punto, anuncia con voz grave el comienzo del examen. Los alumnos, por supuesto, no sospechaban nada y, por tanto, las premisas que anunció el profesor se han cumplido. ¿Dónde estaba entonces el error en el razonamiento de los alumnos?

La paradoja ha suscitado un gran número de artículos y una fuerte polémica con opiniones para todos los gustos: hay quien piensa que no hay paradoja en absoluto, quienes defienden que la conclusión de los alumnos contradice las propias hipótesis de su argumento, e incluso los que relacionan la paradoja con el teorema de indecibilidad de Gödel. Esta falta de acuerdo tiene su origen en la dificultad para formalizar el concepto de sorpresa, que es fundamental en la formulación de la paradoja.

Sin entrar en esta larga y vieja controversia, vamos a analizar aquí una variante que convierte el reto entre el profesor y el alumno en un juego. Supongamos que el alumno puede cada día decir si habrá o no habrá examen. Si acierta la fecha del examen recibe 8 puntos y si falla (tanto por predecir el examen en un día en que no ocurre, como lo contrario) recibe una penalización de 1 punto. Cuando el alumno dice que no hay examen un día en el que, en efecto, no lo hay, no gana ni pierde nada. Evidentemente, el objetivo del alumno es obtener la máxima puntuación mientras que el del profesor es que la puntuación sea mínima. Si el profesor pone el examen el viernes, el alumno ganará con seguridad los 8 puntos, aunque en los cuatro primeros días puede equivocarse varias veces. Por el contrario, si pone el examen el lunes, quizás el alumno no lo detecte entonces, pero los cuatro días restantes no se equivocará y no recibirá ninguna penalización. ¿Cuáles son entonces las mejores estrategias para el profesor y para el alumno?

Supongamos que sólo disponemos de dos días para poner el examen. Las posibles acciones del profesor son: poner el examen el jueves o ponerlo el viernes; mientras que el alumno puede decir que hay examen el jueves o decir que no lo hay, siendo obvia su acción del viernes. La siguiente tabla ofrece la puntuación del alumno para cada combinación de acciones:

		Acciones del profesor (día del examen)	
		Jueves	Viernes
Acciones del alumno	Examen el jueves	8	7
	No examen el jueves	–1	8

Para entender cada entrada de la tabla hay que considerar la puntuación del jueves y la del viernes. Si, por ejemplo, el alumno predice examen el jueves y el profesor lo pone el viernes, el alumno tendrá una penalización de 1 punto el jueves pero ganará 8 puntos el viernes, obteniendo un total de 7 puntos. A primera vista, parece que la acción óptima para el profesor es poner el examen el jueves, porque la columna correspondiente es la que tiene los valores más pequeños, y para el alumno decir que el examen será el jueves, puesto que la fila correspondiente es la que tiene los valores mayores. Sin embargo, el profesor podría, siguiendo este mismo argumento, deducir que el alumno va a decir que hay examen el jueves y de ello concluir que su mejor estrategia es poner el examen el viernes. A su vez, el alumno puede pensar que el profesor piensa que él va a decir que hay examen el jueves. Puede entonces predecir que el profesor va a elegir el viernes como fecha para el examen y, con esa certeza, decir que no hay examen el jueves y ahorrarse la pérdida de un punto, alcanzando una puntuación total de 8. En teoría de juegos son comunes estas situaciones en donde un jugador piensa que el otro piensa que él piensa que el otro piensa... Son juegos en donde no hay una estrategia clara para cada jugador. Sin embargo, si se consideran combinaciones aleatorias de

estrategias, entonces el juego sí tiene una solución óptima para los dos jugadores.

Si el alumno juega la estrategia "examen el jueves" con probabilidad x y la "no examen el jueves" con probabilidad $1 - x$, mientras que el profesor pone el examen el jueves con una probabilidad y, y el viernes con una probabilidad $1 - y$, entonces, la puntuación media del alumno será:

$$p = 8xy + 7x(1 - y) - y(1 - x) + 8(1 - x)(1 - y)$$

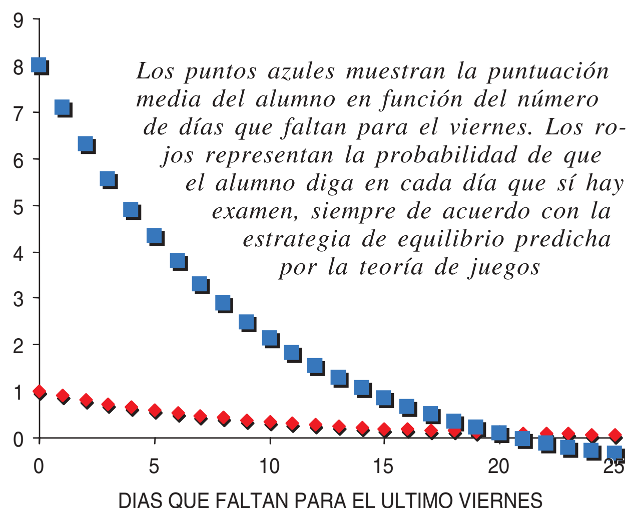
El lector puede comprobar que, si $x = 9/10$, la puntuación media es igual a 7,1 puntos, independientemente del valor de y. A su vez, para $y = 1/10$, la puntuación media es también igual a 7,1 puntos, independientemente del valor de x. En teoría de juegos esta combinación de estrategias se denomina *de equilibrio*, ya que, si un jugador la adopta, el otro no tiene posibilidad de cambiar la puntuación variando su estrategia. Por el contrario, si uno de los jugadores se aleja de la estrategia de equilibrio, el otro siempre tiene a su disposición una nueva estrategia con la que aumentar su ganancia. No obstante, hay que tener en cuenta que estas estrategias combinadas cobran sentido sólo cuando el juego se repite un gran número de veces: un 10 % de ellas, el profesor pondrá el examen el jueves y el 90 % restante el viernes. El alumno, por su parte, dirá un 90 % de las veces que el examen es el jueves y un 10 % dirá que no hay examen el jueves. De este modo ambos se aseguran una puntuación media de 7,1 en cada juego. Sin embargo, es erróneo deducir de ello que, en una situación que consistiera en una sola ronda del juego, el profesor deba poner el examen el viernes y el alumno proclamar que lo ha puesto el jueves. Con ello volveríamos al argumento circular anterior. La estrategia de equilibrio es válida sólo si las acciones se eligen al azar, con las probabilidades prescritas.

En cualquier caso, es curioso que en la estrategia de equilibrio el profesor elija el viernes un 90 % de las veces. La razón es que el alumno está fuertemente inclinado a decir que hay examen el jueves para evitar la puntuación –1. La estrategia de equilibrio presupone esta fuerte inclinación y saca partido de ella poniendo el examen el viernes un gran número de veces, para así evitar que el alumno alcance la puntuación máxima de 8.

Supongamos que ahora disponemos de tres días para el examen. ¿Qué ocurre el miércoles? La tabla de puntuación sería ahora la siguiente:

		Acciones del profesor el miércoles	
		Examen	No examen
Acciones del alumno el miércoles	Examen	8	6,1
	No examen	–1	7,1

Para construir la tabla hemos tenido en cuenta que, si el profesor no pone el examen el miércoles, el jueves tienen que jugar de nuevo a un juego cuya ganancia media hemos ya demostrado que es 7,1 puntos.



Los puntos azules muestran la puntuación media del alumno en función del número de días que faltan para el viernes. Los rojos representan la probabilidad de que el alumno diga en cada día que sí hay examen, siempre de acuerdo con la estrategia de equilibrio predicha por la teoría de juegos

Por tanto, si el alumno dice que sí hay examen el miércoles, pero el profesor no lo pone en este día, entonces tendrá una penalización de un punto y, al día siguiente y con el juego del jueves, ganará, en media y si sigue su estrategia de equilibrio, 7,1 puntos. Su puntuación total media es entonces de 6,1 puntos. Las estrategias de equilibrio en este nuevo juego son $x = 81/100$, $y = 1/10$, y la puntuación media con estas estrategias es ahora de 6,29 puntos. La estrategia del profesor no cambia con los días: siempre decide un 10 % de las veces poner el examen y un 90 % no ponerlo (salvo el viernes, día en el que tiene que ponerlo forzosamente si aún no lo ha hecho). La estrategia del alumno sí cambia a lo largo de la semana: al principio debe decir que hay examen con menos probabilidad que al final. En la figura se puede ver cómo cambia la puntuación media y la estrategia del alumno en función de los días que le separan del viernes. He prolongado la gráfica más allá de los cinco días de la semana para que pueda verse cómo, si el número de días en los que el examen puede ocurrir llega hasta 22, la puntuación media del estudiante se hace negativa.

Se pueden pensar otras variantes del juego: cambiando las puntuaciones, permitiendo que el alumno pueda decir si hay examen o no sólo una o dos veces a lo largo de la semana, etc. Los lectores con conocimientos de teoría de juegos pueden investigar sobre ello y enviarme sus conclusiones. Pero, ¿aporta algo el juego que hemos discutido aquí, o alguna de sus variantes, al análisis de la paradoja original? El juego muestra algo que ya era evidente: que existe la posibilidad de que los alumnos yerren diciendo que no hay examen un día en que lo hay, lo cual es una prueba de la existencia de un examen realmente inesperado. Sin embargo, hay una diferencia sustancial entre el juego y la paradoja. En el juego se permite que el profesor ponga el examen el viernes. Se le penaliza dando 8 puntos al alumno, pero esta penalización puede compensarse con los puntos que éste pierde durante el resto de la semana. Aun así, el juego da una idea de cómo la puntuación media y, por tanto, la capacidad de acertar de los alumnos, va disminuyendo cuando nos alejamos del último viernes.

Mark Fischetti

Lectoras dactilográficas

Las contraseñas son herramientas sencillas para controlar el acceso a ordenadores, redes y transacciones en línea, pero los delincuentes pueden robarlas o descifrarlas. Las lectoras dactilográficas son más seguras, pues es casi imposible falsificar un dedo humano.

En los últimos años se han generalizado dos tipos de lectoras baratas. Las de escáner óptico, las primeras que se ofrecieron en el mercado, toman una imagen digitalizada de la yema por medio de un conjunto de dispositivos de acoplamiento por carga. Las de silicio, o de estado sólido, captan la topografía de la huella dactilar gracias a la acción de diminutos condensadores. En ambos casos, para permitir o denegar el acceso, un programa informático analiza el diagrama geométrico de los detalles de la huella, las crestas y los valles peculiares de cada dedo, y lo compara con los diagramas registrados de los usuarios legítimos.

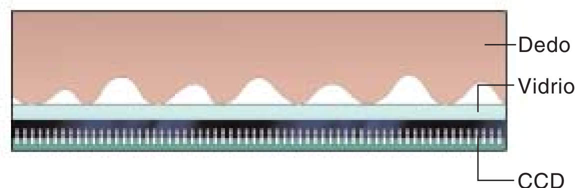
El perfeccionamiento técnico ha reducido las tasas de error y rebajado los costes de estos instrumentos. Van resultando así más útiles. Según Nacem Zafar, presidente de Veridicom, fabricante de Sunnyvale (California), en las mejores lectoras la tasa de aceptación falsa no llega a 2,5 por millón y la de rechazo falso no supera el 3 por ciento. Una lectora de buena precisión puede ya conseguirse por 150 euros o menos. (Los cuerpos policiales emplean lectoras casi exentas de fallos que cuestan de 5000 a 10.000 euros.)

La facilidad con que se integran los programas en los sistemas operativos más empleados ha aumentado la aceptación, pero estos aparatos no se difundirán realmente mientras las docenas de proveedores no acuerden, entre sí y con los fabricantes de ordenadores, unas normas de compatibilidad, afirma Kush Wadhawa, consultor del Grupo Biométrico Internacional. Otras aplicaciones podrían ampliar el mercado, entre ellas el control del acceso físico a empresas y prisiones o el uso de las huellas dactilares en el comercio electrónico.

Quizá radique el mayor obstáculo en la salvaguarda de la privacidad; inquieta que las huellas se archiven, copien o hurten. La técnica reduce la posibilidad de que así se haga, pero, como cuando hay que enviar por Internet información acerca de una tarjeta de crédito, la confianza del público dependerá de la existencia de unas pautas de actuación bien concebidas.



1. EN UN ESCANER OPTICO se emplea un conjunto de miles de dispositivos de acoplamiento por carga, o CCD, para sacar una imagen digital en escala de grises de los valles y crestas del dedo.



DANIELS & DANIELS

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **DINERO EN LA YEMA DE LOS DEDOS:** El mercado de las lectoras dactilográficas podría crecer muchísimo si se aceptase la vinculación electrónica de las huellas a las cuentas bancarias o tarjetas de crédito. Así, una persona podría retirar dinero de un cajero automático sin más que oprimir un dedo contra un escáner montado en la pantalla; de manera análoga pagaría una cena, la gasolina o la compra. En algunos distritos escolares de Pennsylvania se están probando unos escáneres que permiten a los alumnos pagar el almuerzo con un toque de dedo.

➤ **IRIS DE IRIS:** La compleja estructura filamentosa del iris es aún más distintiva que las huellas dactilares. Los sistemas de reconocimiento basados en esa geometría consiguen unas tasas de error bajísimas. Pocas organizaciones han puesto en práctica ese sistema; los escáneres de iris cuestan del orden del doble que las lectoras dactilográficas y los usuarios encuentran embarazoso mirar al interior de un objetivo óptico. Sin embargo, Virgin Atlantic y British Airways están experimentando con un sistema de identificación por iris: los clientes habituales pasarían por un escáner en los controles aduaneros y evitarían las colas para la identificación de documentos escritos.

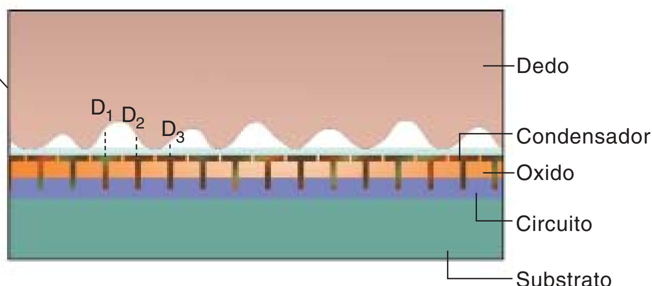
➤ **IDENTIFICACION POR EL OLOR:** Los ingenieros biométricos pueden identificarnos mediante algunas características insólitas: la cara (la distancia de la base de la nariz al labio superior, el ángulo frontal); la voz (frecuencias, cadencia); las orejas (la geometría de la forma del exterior de cada oreja); el modo de andar (la variación de los ángulos corporales al dar un paso); incluso el olor (vapores despedidos por los poros).

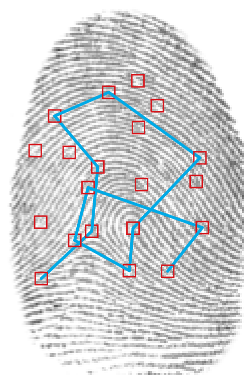




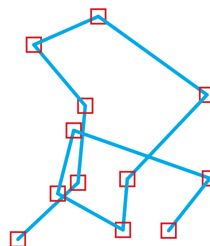
3. CADA DEDO posee un dibujo, particular e inalterable, constituido por pequeñísimos detalles, las crestas, los valles y otros pormenores. Los escáneres dactilográficos los captan.

2. EL ESCANER DE SILICIO carga un conjunto de placas condensadoras hasta un valor conocido. Los valles y las crestas del dedo extraen minúsculas cantidades de carga que varían en función de la distancia (D_1, D_2, D_3) de cada rasgo a una placa. El circuito es sensible a la carga extraída, que se traduce a una distancia. Un programa de ordenador transforma el conjunto de distancias en un mapa de la huella dactilar.





4. UN ESCANER devuelve la huella dactilar en forma de imagen digital en escala de grises de hasta 200 puntos por centímetro. El programa suele registrar de 10 a 40 detalles (*dentro de los recuadros*). Luego calcula distancias y ángulos entre las esenciales (*caracterizados por las líneas*) y así define una plantilla. Mediante algoritmos, las relaciones geométricas se convierten en un conjunto único de números que identifica a la huella y por tanto a la persona.



5. CUANDO LA PLANTILLA se guarda en la memoria, el programa borra la huella dactilar verdadera, para evitar la copia o el robo. Cuando después esa persona ponga el dedo en el escáner, sólo volverá a calcularse su plantilla, y ésta se comparará con la almacenada para determinar si hay coincidencia.

Galileana

Mito y débito

GALILEO IN CONTEXT. Dirigido por Jürgen Renn. Cambridge University Press. Cambridge, 2001. **GALILEO EN ROMA. CRÓNICA DE 500 DÍAS**, por William R. Shea y Mariano Artigas. Ediciones Encuentro; Madrid, 2003.

ESSAYS ON GALILEO AND THE HISTORY OF PHILOSOPHY OF SCIENCE, por Stillman Drake. Vols. I-III. Selección e introducción de N. M. Swerdlow y T. H. Levere. University of Toronto Press; Toronto, 1999.

GALILEO E IL PARNASO TYCHONICO, por Ottavio Besomi, Michel Camerota. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 2000.

DAS PROBLEM DER AUTONOMIE DER NATURWISSENSCHAFTEN BEI GALILEI, por Matthias Dorn. Franz Steiner Verlag Stuttgart, 2000. **DER UNGEBÄNDIGTE GALILEI**, dirigido por Michael Segre y Eberhard Knobloch. Franz Steiner Verlag Stuttgart, 2001.

Se están alejando los historiadores, en sus investigaciones galileanas, del enfoque sectario que coloreó al positivismo decimonónico. Salvo en España. A nuestros estudiantes universitarios y bacalaureandos les exponen todavía interpretaciones de Galileo y su obra sobradas de tópicos envejecidos. Parece, pues, oportuno echar un vistazo a ese momento decisivo de la gestación de la ciencia moderna según lo contempla la historiografía reciente. Dos obras, de planteamiento complementario, sirven de marco general: *Galileo in Context* y *Galileo en Roma.*

En el haz agavillado por Jürgen Renn los autores de las tres partes componentes (ingeniería, arte y sociedad) convergen en un mismo resultado, a saber, el desmoronamiento del "mito Galileo", entendiendo por tal la imagen de un sabio solitario, salido de la nada, creador del método científico y en lucha tenaz contra las fuerzas de la represión. Muy al contrario, no puede comprenderse la gesta galileana si no se conocen la influencia de los ingenieros de su tiempo en la mecánica del pisano, el papel determinante de las técnicas de representación visual utilizadas en su astronomía y las estructuras de poder que prestaron apoyo al desenvolvimiento de su carrera académica y científica. La ciencia de Galileo brota del encuentro fructífero, aunque conflictivo, entre el legado teórico transmitido por la universidad y el conocimiento práctico de los ingenieros.

¿Cómo hemos llegado a esa conclusión? La investigación histórica se inicia en las postrimerías del siglo XIX con los trabajos de Antonio Favaro y su *Edizione Nazionale* de las obras de Galileo. De la lectura de sus primeros escritos aristotélicos y su extensa correspondencia se desprende cuánto debe a los autores antiguos, medievales y contemporáneos. Sobre ello llaman la atención Raffaello Caverni y Emil Wohlwill. (La escuela alemana, decisiva en esa primera época, sólo ahora empieza a despertar tras decenios de letargo, según se promete en *Das Problem der Autonomie der Naturwissenschaften bei Galilei* y *Der ungebändigte Galilei.*) Caverni y Wohlwill, en su afán de objetividad crítica, no pasaron por alto tampoco el fracaso de Galileo en su empeño por alcanzar un principio general de inercia. En esa misma línea de incardinar a Galileo en una tradición que arrancaba de la baja Edad Media abundaron otros historiadores; en particular, Pierre Duhem, Anneliese Meier y Eduard Jan Dijksterhuis. (Una corriente historiográfica que ha tenido, en los últimos decenios, sus derivaciones en los estudios sobre la importancia de los Calculadores de Oxford para el desarrollo de la mecánica e introducción de la matemática en física.)

Aunque el papel de los ingenieros en la génesis de la ciencia moderna había sido notado ya, a comienzos del siglo XX, por Edgar Zilsel y Leonard Olschki, la segunda ola de estudios galileanos, representada por los filósofos Natorp, Cassirer y Husserl, hizo caso omiso de esa influencia. El principal sistematizador de la interpretación filosófica de Galileo, Alexandre Koyré, llegaba incluso a afirmar que el platonismo matemático de éste apuntaló la nueva doctrina sobre el movimiento. En opinión de Koyré, la ciencia cartesiana y galileana fue de suma importancia para el ingeniero y el técnico, pero no fue ni creada ni desarrollada por ingenieros o técnicos, sino por teóricos y filósofos. Y apostillaba: la ciencia de Galileo y de Descartes fue elaborada por hombres que raramente construyeron algo más real que una teoría. Contra semejante aserto pugnó, con apabullante documentación Stillman Drake (*Essays on Galileo and the History of Science*).

A lo largo de cuarenta años, desde su traducción al inglés del *Dialogo sobre los dos principales sistemas del mundo*, con prólogo de Albert Einstein (finamente analizado por Finocchiaro en *Der ungebändigte Galilei*), Drake fue uno de los estudiosos más fecundos sobre la obra galileana. Publicó espléndidas biografías, traducciones y muchos artículos sobre las tesis fundamentales del pisano. Con notable perspicacia, en particular, sobre caída de los cuerpos y otros puntos de la mecánica. Describió las dificultades a las que Galileo hubo de enfrentarse para exponer el movimiento uniformemente acelerado, en cuyo razonamiento se trasluce la deuda contraída con el libro V de Euclides, que presenta la teoría de las proporciones de Eudoxo. En el rigor de unas mediciones precisas sitúa Drake el quicio de la física matemática galileana.

Innovó la historia de la ciencia repitiendo los experimentos, con los útiles empleados por Galileo,

para mejor entender qué se proponía, qué lograba, con qué dificultades tenía que bregar. Drake analizó así las notas manuscritas sobre los cuerpos que descienden por planos inclinados y péndulos. En uno de ellos descubrió mediciones casi exactas de las sucesivas posiciones ocupadas por una bola que se desliza con suavidad a lo largo de un plano inclinado, pautando el tiempo con ritmo musical. Drake nos hizo saber que los grandes hallazgos de la física matemática galileana, la ley de la caída de los graves, con la asociada ley del péndulo, y la ley de la trayectoria parabólica de proyectiles lanzados horizontalmente, resultaron de cálculos en los que empleó precisas mediciones físicas.

Fauna española

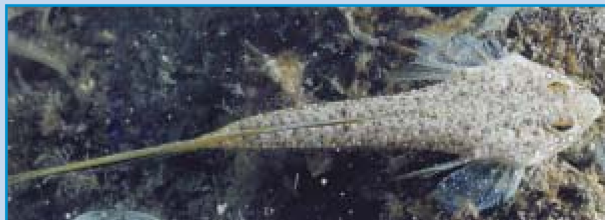
ENCICLOPÈDIA DE MENORCA. VERTEBRATS. VOL. I. ELS PEIXOS, por Lluís Cardona y Manuel Elices. Obra Cultural de Menorca; Mahón, 2002.

La *Enciclopèdia de Menorca* en todas sus publicaciones, las habidas hasta ahora, se ha caracterizado por la calidad de las mismas. En el *Tom V, Vertebrats, Volum 1: Els Peixos* sigue la misma tónica. Lluís Cardona, excelente profesional surgido de la Universidad de Barcelona, y Manuel Elices han llevado a término una obra extraordinaria. El primero ha sido responsable básicamente del texto, mientras que el segundo es autor de prácticamente toda la formidable ilustración fotográfica. Han contado con la colaboración de J. M. Martín y J. Corbera para los dibujos, así como de las hojas de identificación de especies de la FAO.

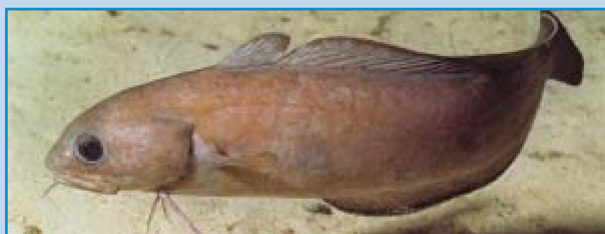
La exposición sigue el camino de la evolución, el único que da sentido y lógica al pensamiento biológico. Dentro de este marco evolutivo, los autores sitúan a las distintas especies, hacen una descripción pormenorizada de las mismas y dan gran cantidad de datos sobre su tipo de alimentación y sobre el medio en que viven.

En el primer capítulo dan las razones de la clasificación seguida, la más actual y lógica, obtenida cladísticamente, y para información del lector dan una explicación de las bases del sistema cladístico. El capítulo segundo lo destinan al estudio de la anatomía de los peces, de su estructura y de cómo ésta nos da idea de su comportamiento. La fisiología, centrándose sobre todo en el control de la flotabilidad, la respiración y la circulación sanguínea, el metabolismo energético y el crecimiento, integran el capítulo tercero. En el cuarto capítulo exponen el comportamiento de los peces, exponiendo previamente cómo incorporan la información, es decir, los órganos de los sentidos, y distintos tipos de alimentación que presentan. En él hacen hincapié en los modos de seleccionar la pareja y la problemática de la construcción de nidos; en definitiva, en las estrategias reproductivas así como en el mantenimiento del territorio.

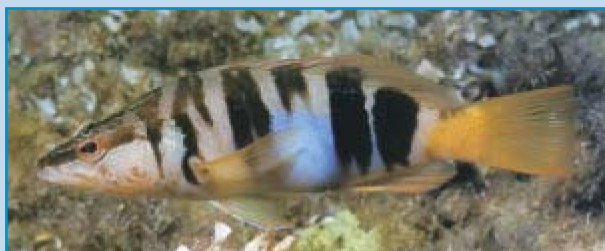
Sin menoscabo de la importancia y corrección de los capítulos anteriores, el capítulo quinto es el que da máxima originalidad al libro. Está dedicado al catálogo de los peces de Menorca. Las especies se clasifican según las propuestas recogidas por Stiassny *et al.* (1996) y por Paxton y Eschmeyer (1998), los nombres científicos son, como dicen los autores, los propuestos por Whitead *et al.* (1986) y la mayoría de los nombres vulgares han sido recogidos previamente por Mayol *et al.* (2000) a propuesta de Miquel Duran. Los autores han hecho un gran esfuerzo por precisar la



El dragonet (Callionymus pusillus)



La móllera de roca (Phycis phycis)



La vaca (Serranus scriba)

selección del hábitat y la distribución batimétrica de las distintas especies. Con idéntico cuidado se dan datos sobre la alimentación. Este capítulo será referencia obligada para futuras obras.

Para redondear la obra hay dos anexos. El anexo 1, resuelto por Adrià Casino, da una muy buena interpretación actual de la filogenia de los vertebrados, describiendo las transformaciones habidas en su morfología básica y situando perfectamente al lector dentro del árbol de la evolución de los vertebrados. El anexo II, *Els noms dels peixos de Menorca*, ha sido resuelto por Xavier Gomila a partir los nombres utilizados en Ciudadela, Fornells y Mahón. Se le ha de agradecer la labor realizada, que concluye con un diccionario multilingüe.

En conjunto, pues, una gran obra que será de obligada consulta por todo aquel interesado en la fauna íctica no sólo de Menorca, sino también de Baleares.

—JACINT NADAL



Gran Duquesa Cristina de Lorena, madre de Cosimo II

Drake reveló incluso la secuencia de la evolución mental de Galileo. En su primera exposición sobre el comportamiento de la velocidad en el movimiento, aparecida en el *De motu*, que compuso en Pisa en 1591-92, se refugiaba todavía en razones causales, teóricas, ayunas de un trabajo experimental previo. A lo largo de los diez años siguientes, en Padua, Galileo se dedicó principalmente a la *techne*. Escribió tratados sobre mecánica, arquitectura militar y medición de las distancias por inspección topográfica y triangulación. Un instrumento que él ideó con ese propósito resultó útil también para medir y calcular en general. Había, pues, llegado a conocer bastante sobre el movimiento real cuando, en 1602, volvió al estudio del movimiento natural. En ese año creía todavía en lo que había defendido en 1590, a saber, que la aceleración en el descenso libre de los graves era un episodio breve; desde el estado de reposo avanzaba a velocidad constante, apropiada a su peso y a la densidad del medio, velocidad que dependía sólo de la razón entre la distancia y el descenso vertical. Sin haber aún pensado en la aceleración, Galileo dedujo, por vía geométrica, y a partir de esos falsos supuestos, una conclusión verdadera, el "teorema de Galileo": a lo largo de una cuerda y hasta el punto más bajo de un círculo vertical, el tiempo de descenso es el mismo con independencia de la longitud y pendiente de la cuerda. Guidobaldo del Monte objetó que su propia experimentación no confirmaba tal cosa. Guidobaldo había trabajado con una bola que rodaba por el perímetro de una llanta circular; Galileo recomendaba la observación a lo largo de un péndulo para reducir impedimentos materiales y dificultades de procedimiento.

Durante 1603 solucionó algunos problemas mediante la aplicación del teorema anterior, pero sus notas revelan que era consciente de que no podía adelantar mucho sin conocer de qué modo cambiaba la velocidad durante la aceleración. Intentó dos conjeturas. Una basada en la teoría medieval del impetus. Según la otra, formulada también en la Edad Media, en la aceleración uniforme a partir de un estado de reposo, la velocidad final es doble de la velocidad general. Ninguna de las dos conjeturas le ofrecieron una clave útil sobre el cambio de velocidad operado en el curso de la aceleración. A comienzos de 1604 se le ocurrió medir experimentalmente algunas velocidades a lo largo de un plano inclinado real.

Hacia finales de ese año buscó una regla que relacionase el aumento de la velocidad durante el descenso natural. A partir de mediciones precisas llegó a las leyes de la caída libre y el péndulo.

Sirviéndose de un plano con suave pendiente, y notas musicales de medio segundo para cronometrar el tiempo, Galileo midió la distancia recorrida por una bola desde el estado de reposo, durante cada uno de ocho tiempos sucesivos e iguales. Por unidades de longitud se sirvió de *punti* de unos 0,95 mm; la precisión de la cadencia alcanzaba hasta 1/50 segundos. En consecuencia, los números que él registró le dieron, casi de golpe, la regla de que las distancias desde el estado de reposo se hallaban en la misma razón que el cuadrado de sus tiempos respectivos. Las distancias medidas estaban de acuerdo con el cálculo dentro de un 2 por

ciento. La ley del cuadrado del tiempo permitió a Galileo relacionar correctamente distancias y tiempos en numerosos problemas y teoremas, que se aprestó a escribir en los años siguientes inmediatos. Esas magnitudes eran directamente mensurables. Sin embargo, habían de pasar tres años más, antes de advertir de que las velocidades en el movimiento acelerado no eran proporcionales a las distancias, sino a la raíz cuadrada de las distancias.

También en astronomía Galileo realizó mediciones precisas. En la segunda mitad de 1610 abordó el problema de determinar los períodos de los satélites de Júpiter, tarea que Kepler consideraba imposible debido a la dificultad de distinguir los satélites, lo que terminó en marzo de 1611, si bien refinó los registros más tarde según apareció en el *Discurso sobre los cuerpos que flotan* (1612) e incluso luego en los diagramas para los movimientos de los satélites en las *Cartas sobre las manchas solares* (1613). En 1612 incorporó en el telescopio un tipo de micrometro óptico, que él menciona en su diario de las observaciones de los satélites de Júpiter. Al año siguiente, midiendo los ángulos del firmamento hasta diez segundos de arco, registró una estrella supuestamente fija cerca de Júpiter que, a su parecer, había cambiado de posición. Según Drake, se trataba de Neptuno, hallado así antes de su descubrimiento oficial en 1846.

Pese a tan fructífera investigación, Drake no supo apreciar los condicionantes filosóficos, atomistas en particular, de su tratado de la materia y sus propiedades. A ampliar ese horizonte se han dedicado, en los últimos años, una hornada de historiadores que tornan a revalorizar los planteamientos primigenios de Favaro, Wohlwilly Caverni. En la triple contextualización referida más arriba, la primera subraya la labor de un Galileo ingeniero. Dicho de otro modo, el origen de la mecánica moderna debe buscarse en la *techne* de los prácticos, que contaban con la recuperación de los tratados de Arquímedes. Galileo se inscribe en la tradición de los ingenieros italianos del Renacimiento. De entrada, por su formación: discípulo del matemático e ingeniero Ostilio Ricci. Luego, por su propia docencia, pues en las clases de matemática aplicada impartía lecciones sobre fortificación, topografía, mecánica, óptica, uso del sector, etc…; o su propio taller en Padua, donde fabricaba instrumentos que inventó o desarrolló de una manera especial. Solicitó una patente de la *Signoria* de Venecia sobre el ingenio inventado para elevar agua en 1593-94, muestra de su constante aplicación a obras ingenieriles (bombas, canalización de los ríos y demás), a lo largo de su vida, tarea asociada a su condición de matemático de la corte medicea.

Los ingenieros se esforzaron por aplicar la mecánica a la solución de problemas relacionados con el impacto, cantidad de movimiento, caída libre y trayectoria de proyectiles, cuestiones que trascendían los límites habituales de la estática e hidrostática. Ninguna investigación teórica del problema de la trayectoria de los proyectiles podía soslayar el tratamiento de conceptos claves de la doctrina del movimiento en la tradición de la filosofía natural académica (cuerpos graves, cuerpos ligeros, movimiento natural y movimiento violento, entre otros). ¿Qué camino optaron? El de abrir nuevos horizontes; por ejemplo, colocar en un nuevo marco las proposiciones aristotélicas de la caída libre dentro del marco conceptual de la hidrostática.

El segundo contexto en que hemos de introducir la aportación galileana a la ciencia moderna se entrelaza con las representaciones virtuales. Artistas e ingenieros compartieron mecenazgos, formación académica, equipos y técnicas comunes. La expresión plástica los aunó también. En Galileo, más que las propias palabras, las acuarelas de la Luna constituyen la herramienta eficaz para convencer sobre la veracidad de sus observaciones. Tenemos un testimonio inmediato y de especial contundencia. En 1610, Ludovico Cigoli recibió el encargo de pintar la capilla del papa Paulo V en Santa Maria Maggiore, en cuya composición el eje central de la cúpula debía reservarse para una representación de la advocación Reina de los Cielos, de pie sobre la Luna. Dos años más tarde, concluida la labor, el satélite aparece con una superficie irregular: una hemiesfera con sombras e hilos de luz en su parte iluminada para provocar la impresión de elevaciones y depresiones. Cigoli había recogido, con el visto bueno de la autoridad eclesiástica, las ilustraciones y la doctrina del *Sidereus nuncius* de Galileo.

Ello nos lleva al tercer contexto, el de las estructuras sociales, políticas y académicas, que ejemplificaremos en su relación con la Iglesia. Para ello nos serviremos de la obra, excepcional por su rigor y claridad expositiva, de Shea y Artigas (*Galileo en Roma. Crónica de 500 días*). Abordan la figura, doctrina y proceso a través de los seis viajes que realizó el pisano a lo largo de su vida: en 1587, en busca de reco-



Retrato de Christopher Clavius



Detalle de un fresco en la Tribuna di Galileo, Florencia

mendación para una plaza universitaria; en 1611, para conseguir el reconocimiento de sus descubrimientos telescópicos; en 1615-1616, para defender el copernicanismo; en 1624, para sondear la posibilidad de escribir sobre el movimiento de la Tierra; en 1630, para obtener el permiso de publicación del *Diálogo*; y en 1633, para enfrentarse al proceso inquisitorial.

El joven Galileo, partidario todavía del geocentrismo, visita en 1587 el Colegio Romano, la solvente institución donde profesa Clavius. Le enseña al sabio jesuita el ensayo que acaba de redactar sobre el centro de gravedad de los sólidos. Clavius, impresionado, discute algunos puntos, y le pone al día de la reforma del calendario. En Roma traba amistad con otras personalidades, que le apoyarán en adelante. La Iglesia, cae así otro mito, ayudó a Galileo a lo largo de muchos decenios.

Pero en 1589 admitía ya la hipótesis heliocéntrica. Pasó de la conjetura a la teoría en 1609, cuando perfeccionó el telescopio con la combinación de una lente cóncava con una convexa y lo apuntó hacia la Luna. En la parte oscura, cerca de la divisoria, aparecían puntos brillantes, picos de montañas sobre los cuales cae la luz del Sol naciente. Al enfocar las estrellas se maravilló ante número inmenso, sembradas por todo el firmamento, incluida franja de la Vía Láctea. Tras una profunda mejora de su telescopio, observaba, en enero de 1910, cuatro satélites de Júpiter. De tales observaciones se ocupa *El mensajero celeste*, publicado dos meses después. Antes, sin embargo, de descubrir ese mismo año los “compañeros” (anillos) de Saturno y las fases de Venus. Al volver en 1611 a Roma, es ya un físico y astrónomo famoso. Sus hallazgos reciben respaldo cauteloso del Colegio Romano. Difícilmente podía haber sido de otro modo cuando se proponía, contra la enseñanza aristotélica, una superficie lunar montañosa e irregular, satélites en órbita alrededor de Júpiter (prueba de que no todos los cuerpos celestes giran alrededor de la Tierra) o fases en Venus (al me-

nos había un planeta que daba vueltas en torno al Sol). Por si fuera poco, durante la estancia romana identificó las manchas solares, otro mazazo contra la doctrina peripatética: ni siquiera el Sol estaba compuesto de la supuesta quinta esencia, la sustancia imperecedera e incorruptible.

Menos afortunado resultó para Galileo el viaje de 1616. Había publicado ya, como hemos mencionado, el *Discurso sobre los cuerpos que flotan* y las *Cartas sobre las manchas solares*. En esta última defendía, con la aprobación de los censores, el sistema copernicano. Belarmino, que se había mostrado inquieto ante la interpretación, avanzada por otros, de una lectura metafórica del texto bíblico relativo al movimiento del Sol, veía en la doctrina copernicana una hipótesis instrumentalista, una hipótesis matemática para calcular con mayor precisión la posición de los planetas, sin que de ello se dedujera la realidad de los movimientos del firmamento. Galileo ahonda en el problema hermenéutico en su *Carta a Castelli* y en la *Carta a la Gran Duquesa Cristina de Lorena*, sus escritos más brillantes sobre el uso de los textos de la Escritura en asuntos científicos, es decir, sobre la autonomía de la física (*Das Problem der Autonomie der Naturwissenschaften bei Galilei*). No hemos de confundirlo con la añeja cuestión de la doble verdad, según la cual habría una verdad en el terreno de la física y otra en el de la teología. La verdad, para Galileo como para Belarmino, era una y la misma. Lo que estaba en juego era la interpretación de la Biblia, problema que hemos de entender en el horizonte de la Reforma Protestante que rechazaba la posibilidad de una lectura canónica de los textos sagrados. La Escritura, afirma Galileo, no yerra en asuntos de verdad y fe, pero el intérprete sí puede errar; además, no debemos separar el género literario empleado con el destinatario, un pueblo rudo e inculto, no los especialistas en astronomía. Por contra, la matematización de las ciencias aseguraba su autonomía, sin necesidad de una sanción externa. En cuanto autónomas, las ciencias naturales tienen sus propias leyes, se autolegitiman, se autorregulan y se autoexplican. Pero ocurría que en la doctrina copernicana, que Galileo situaba en el contexto exclusivo de la física, se entraba en colisión con una lectura literal de la Escritura. Y entraba en colisión, sobre todo, con la doctrina aristotélica, que propugnaba el desdoblamiento del mundo en una parte terrestre y una parte celeste. Además, Galileo defendía un concepto atomista de las cualidades; frente al hilemorfismo mantenía que la sustancia se componía de figura, magnitud, número o movimiento.

Su talante polemista se refleja en un episodio posterior de su vida, puesto ahora de relieve. Entre agosto y diciembre de 1618 se produjeron diversos fenómenos luminosos celestes, algunos de los cuales entraban de lleno en la clasificación de cometas. La última aparición en particular, que se prolongó desde finales de noviembre hasta más allá de la mitad de enero de 1619, debió de ser impresionante, pues su cola irradiaba a lo largo de casi cuarenta grados. Atrajo la atención de los astrónomos, encendiendo un amplio debate sobre la naturaleza y el significado (astronómico y astrológico) de tales "impresiones" celestes. La polémica cometaria se extendió de 1619 a 1623 y Galileo tomó parte activa (*Galileo e il Parnaso Tychonico* y *Der ungebändigte Galilei*). El fenómeno arruinaba la doctrina peripatética de la incorruptibilidad de los cielos. En el primer libro de los *Meteorologica*, el Estagirita atribuía los episodios cometarios a una causa terrestre, la ascensión de una "exhalación seca, para salvaguardar la tesis de la absoluta perfección de las regiones celestes. En el *Discorso delle comete*, redactado a cuatro manos con su discípulo Mario Guiducci, y publicado con el nombre de éste en junio de 1619, respondía al *De tribus cometis anno MDCXVIII disputatio astronomica* del jesuita Orazio Grassi. Para Galileo y Guiducci, los cometas seguían una trayectoria rectilínea, desde la superficie de la Tierra hasta el cielo. Pero había más, Galileo reconocía el ligamen entre la trayectoria rectilínea de los cometas y el movimiento de la Tierra. Según parece, se inspiraron en la *Assemblea celeste radunata novamente in Parnaso sopra la nova cometa*, donde se sacaban a la luz las incongruencias y otros puntos débiles de la tesis aristotélica.

Del cuarto viaje Galileo había regresado a Florencia convencido de que podía escribir sobre el movimiento de la Tierra, con tal de evitar pronunciarse sobre su realidad. Expuso sus ideas en el *Diálogo sobre los dos grandes sistemas del mundo*, motivo de la quinta visita a Roma. El *Diálogo* se desarrolla en cuatro jornadas. Intervienen Filippo Salviati, viejo amigo suyo, que aboga por la tesis copernicana, Giovanfrancesco Sagredo, de mente abierta y proclive también hacia el heliocentrismo, y Simplicio, caricatura del aristotélico necio. Dedica la primera jornada a la exposición de la cosmología escolástica y a su rechazo. Las montañas de la Luna muestran su semejanza con la Tierra; por tanto, su constitución y leyes serán las mismas también. Supernovas y cometas mostraban el carácter alterable del firmamento. En la segunda jornada se examina la posibilidad de la rotación diaria de la Tierra; en la tercera, el movimiento anual alrededor del Sol en compañía de Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Consagra la cuarta al flujo y reflujo de las mareas, que erróneamente supuso constituía la prueba física decisiva del movimiento de la Tierra.

Desde abril de 1631, Galileo era clérigo. Había recibido órdenes menores para disfrutar de una canonjía de la catedral de Pisa. Pero le esperaba su trance más doloroso, el proceso inquisitorial, descrito con pormenor en la obra de Shea y Artigas. La rotación de la Tierra, aunque no era un dogma, obligaba a una nueva lectura de los textos sagrados. Abría, además, las puertas a la posible existencia de seres inteligentes fuera de nuestro planeta, lo que planteaba espinosas cuestiones teológicas relacionadas con el misterio cristiano de la Redención. Tras el confinamiento subsiguiente al decreto de condena, apareció en Holanda su obra científica más importante, *Las dos nuevas ciencias*. Sobre este libro, cimiento de la física moderna, Roma no se pronunció.

—LUIS ALONSO

Aventuras problemáticas

Dennis E. Shasha

Reventar la caja

Supongamos que es usted un ladrón (de buen corazón, claro está, como Robín de los Bosques). Tiene usted que averiguar la combinación de una caja fuerte provista de 10 mandos, que pueden, cada uno, hallarse en una de tres posiciones: baja, central o alta. Hay exactamente 3^{10} (= 59.049) posibles combinaciones de ajustes de estos mandos. Por suerte para usted, hay 3^8 (= 6561) combinaciones que abren la caja. La regla para abrir la caja es sencilla: si dos de los mandos están en las posiciones debidas, basta accionar la manecilla de la puerta. Los otros ocho mandos no tienen importancia. Pero, claro, no sabemos cuáles son los dos mandos decisivos, que no tienen por qué ser contiguos.

Siendo tantas las combinaciones que abren la caja, una buena estrategia puede consistir en tomar una al azar: es probable que uno de cada nueve ensayos permita abrir la caja. Pero como usted nunca ha sido persona de mucha suerte, desea idear un método infalible para abrir la caja rápidamente. ¿Puede garantizar que la caja quedará abierta sin tener que ensayar más de 20 combinaciones? Y, de ser así, ¿qué combinaciones ensayaría?

Veamos un problema preliminar, que le sirva de orientación. Supongamos que solamente haya cuatro mandos, con tres posiciones cada uno, y que para abrir la caja sea necesario que dos de los mandos se encuentren en la posición debida. ¿Cuántas combinaciones habría que ensayar para garantizar la apertura de la caja? Aun sabiendo cuáles son los dos mandos críticos habría que probar nueve combinaciones. (Las nueve combinaciones son AA, AB, AC, BA, BB, BC, CA, CB y CC, donde A representa la posición de arriba, B la de en medio y C, la de abajo. Sin embargo, aunque no sepamos cuál es el par crucial, todavía se puede asegurar la apertura de la caja ensayando las 11 combinaciones indicadas en la ilustración al pie. Como se puede ver, esta lista no muy larga contiene las nueve combinaciones correspondientes a cualquier par de mandos, sean contiguos o no. Y ahora, ¿sabría usted hallar una lista similar para la caja de 10 mandos?

Solución del problema del mes pasado:

Se elige una caja al azar y se toma de ella una bengala. Se ensaya, y si es buena, se toman las otras cinco del mismo grupo. En caso contrario, se toman cinco de la otra caja. Solamente se puede perder en el caso de haber elegido inicialmente el grupo de las malas y tomado de ese grupo una de las buenas que contiene. La probabilidad de que ocurran ambas cosas es 1/4 (= $1/2 \times 1/2$), por lo que la probabilidad de ganar es 3/4. Con cuatro fallos en la caja defectuosa, la probabilidad de perder es 1/6 (= $1/2 \times 1/3$), con el resultado, a primera vista paradójico, de que con más bengalas defectuosas aumenta la probabilidad de ganar. Puede verse una explicación más completa visitando www.investigacionyciencia.es

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.

Combinaciones para abrir una caja de cuatro mandos

	Mando 1	Mando 2	Mando 3	Mando 4
1	A	C	C	C
2	B	B	B	C
3	C	B	A	A
4	A	A	B	A
5	A	B	C	B
6	B	A	A	B
7	C	A	A	C
8	B	C	C	A
9	C	C	B	B
10	C	A	C	B
11	A	C	A	A



HEIDI NOLAND

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA RESOLUCION DEL PROBLEMA DE LOS NEUTRINOS SOLARES, por Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y David L. Wark

El Observatorio Sudbury de Neutrinos ha resuelto un misterio planteado hace 30 años, al poner de manifiesto que los neutrinos provenientes del Sol cambian de clase en su camino hacia la Tierra.

FARMACOS DE NUEVA GENERACION, por Robert Langer

Se buscan fórmulas originales para la administración de medicinas de nueva generación: microchips implantados, polímeros adhesivos y permeabilización de la piel por ultrasonidos.

FUTURO DEL ETNA, por Tom Pfeiffer

El mayor volcán de Europa, también el más activo, se está volviendo muy peligroso. Para fortuna de los que viven en su cercanía, la transformación se está produciendo con notable lentitud.

PROTOSEÑALES DE LA EXISTENCIA DE VIDA, por Sarah Simpson

La ciencia se ha visto obligada a reconsiderar los criterios de identificación de señales de la existencia de vida, lo mismo en las rocas más antiguas de la Tierra que en testigos procedentes de otras partes del sistema solar.

EL PERIPLASMA PROCARIOTA, por Francisco Castillo, Rafael Blasco, Manuel Martínez Luque-Romero, Francisco J. Caballero y Conrado Moreno-Vivián

El espacio periplásmico procariota es un compartimento subcelular que contiene proteínas esenciales para la catálisis de los ciclos biogeoquímicos y para la adaptabilidad bacteriana al medio.

AURORAS NEGRAS, por Göran Marklund

Estas regiones desprovistas de luz acompañan a las auroras boreales, de las que son una especie de negativo. Los electrones ionosféricos escapan de ellas; tras de sí dejan agujeros en la densidad electrónica de la atmósfera.

LA MALLA: COMPUTACION SIN LIMITES, por Ian Foster

La técnica de malla, por vinculación a escala planetaria de procesadores digitales, sistemas de almacenamiento y de programas, se apresta a transmutar la informática, reemplazando los sistemas propios de los individuos o corporaciones por un servicio público.

LA ASTRONOMIA GRIEGA Y LA TRADICION ARABE MEDIEVAL, por George Saliba

Los astrónomos islámicos de la Edad Media no fueron simplemente traductores. Puede que desempeñaran también un papel clave en la revolución copernicana.

LA VERDAD SOBRE GINKGO BILOBA, por Paul E. Gold, Larry Cahill y Gary L. Wenk

Este popular suplemento vegetal puede mejorar ligeramente la memoria, pero se conseguiría el mismo efecto comiendo una barrita de dulce.

INVESTIGACION y CIENCIA